# Spektrum
## DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT 3/08 MÄRZ 2008

INTERNET: **Staufrei fahren auf der Datenautobahn**

SERIE GEHIRN (TEIL IV)
**Was nehmen Wachkoma-Patienten wahr?**

ANTON ZEILINGER
**Ein Physiker mit Fernwirkung**

ARCHÄOLOGIE
**Machtkämpfe im Land der Maya**

# Masterplan für das Solarzeitalter

**Wie die USA bis 2050 von Ölimporten unabhängig werden könnten – und welchen Weg Europa gehen muss**

7,40 € (D/A) · 8,– € (L) · 14,– sFr.
D6179E

www.spektrum.de

# EDITORIAL

Reinhard Breuer
Chefredakteur

## Heiliger Respekt vor den Urvätern

**Wissenschaft wird von Menschen gemacht**; nicht von Labors oder Computern, nicht einmal von Exzellenzinitiativen. Natürlich sind die alle nützlich und manchmal sogar unverzichtbar. Aber ohne Menschen, die sich früh einem harten Problem verschreiben und dieses, oft auch gegen Widerstände, für lange Zeit durchboxen, würde die Wissenschaft nicht voranschreiten. Was häufig hinzutritt, sind biografische Umstände, die sich nicht immer planen oder steuern lassen: Lehrer, die sie motivieren, Hochschulforscher, die sie faszinieren und – vielleicht am wichtigsten – zu Forschungsthemen führen, die sich als produktiv herausstellen.

Auch unsere Artikel werden von Wissenschaftlern geschrieben, doch diese selbst treten natürlich hinter ihrem Thema zurück. Wie sie über ihre eigenen Forschungsgegenstände denken und was sie dorthin brachte, bleibt deshalb weit gehend unsichtbar. Dabei wäre das doch durchaus interessant.

**In loser Folge wollen wir daher künftig Wissenschaftler porträtieren**, die auf ihrem Gebiet Maßstäbe gesetzt und Durchbrüche erzielt haben. Es werden Natur- und Geisteswissenschaftler sein, die wir Ihnen nahebringen wollen. Den Anfang macht in dieser Ausgabe der österreichische Experimentalphysiker Anton Zeilinger. Schon an einem Wiener Gymnasium hat ein Lehrer ihn für die Physik begeistert. Wie unser Mitarbeiter Michael Springer im Interview mit dem Quantenphysiker erfuhr, hatten sie nicht nur beide denselben Lehrer, sondern studierten tatsächlich auch beide in Wien Physik. Später trennten sich ihre intellektuellen Sphären.

Als dann im Jahr 1965 auch ich den jungen Anton Zeilinger während seines Studiums kennen lernte, spielte ich selbst gerade mit der Idee, in die Physik zu gehen. Ich gestehe, dass mich damals die hehre Vorstellung bewegte, mich damit dem Mysterium der Wahrheit nähern zu können. Vor Kurzem berichtete ich ihm davon und wollte wissen, was ihn seinerzeit selbst zu diesem Studium getrieben habe. Zeilinger bekannte, dass er seine Tätigkeit »nie unter dem Gesichtspunkt ›Mysterium‹ gesehen« habe. »Es war und ist ganz einfach Neugier, ganz praktisch verstanden.« Der Quantenphysiker erwähnte aber noch den »heiligen Respekt«, den er bis heute vor den »Urvätern« wie Einstein, Planck, Bohr und Schrödinger habe.

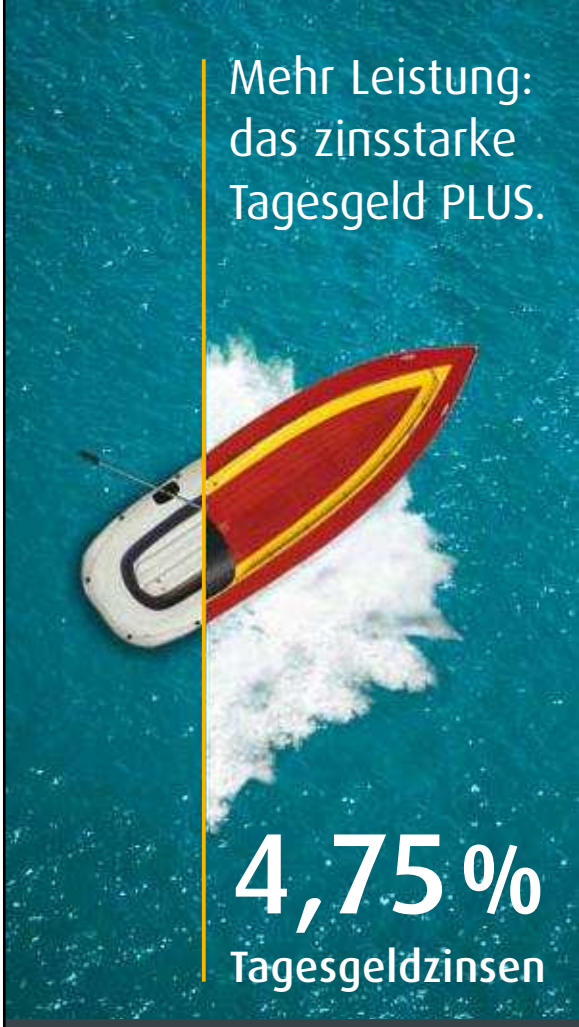
»Offenheit und Neugier« nennt er auch in seinem Buch »Einsteins Spuk« als treibende Motive für seine Forschungen zu »Teleportation und weiteren Mysterien der Quantenphysik«. Wenngleich es vielleicht nicht sein Motiv gewesen mag – auf das Mysterium hat sich Anton Zeilinger gleichwohl eingelassen (S. 38).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

Wenn Sie in diesem Heft den Artikel »Die Parallelwelten des Hugh Everett III« vermissen, der als Gewinner der letzten Wunschartikelrunde versprochen war, muss ich Sie vertrösten: Er ist in die nächste Ausgabe gewandert.




> Neu: der Durchstarterzins!

- 4,75 % p.a. für 6 Monate – exklusiv für Neukunden, anschließend 3,8 %* p.a.
- Zinssatz gilt bis 30.000 Euro, Anlage täglich verfügbar
- Rentabler als ein Sparbuch – genauso sicher
- Kostenlose Kontoführung

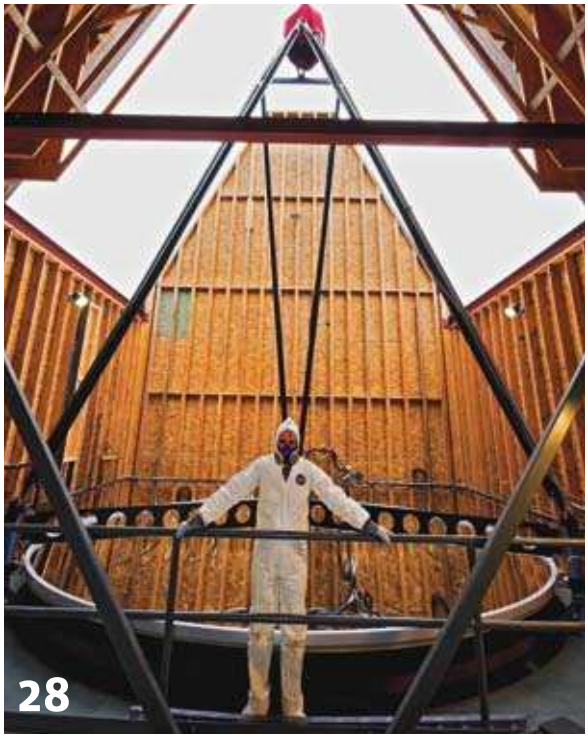
* Zinsanpassung gemäß Marktentwicklung möglich

www.comdirect.de oder 01803 - 44 45
(0,09 Euro/Min. aus dem Festnetz der Dt. Telekom/ Mobilfunkpreise ggf. abweichend)

.comdirect
Ihr Geld kann mehr

# INHALT

**MÄRZ 2008**




ASTRONOMIE & PHYSIK Flüssige Teleskopspiegel

ASTRONOMIE & PHYSIK Anton Zeilinger über Quantenphysik

MEDIZIN & BIOLOGIE Bewusstseinsreste im Wachkoma

## AKTUELL


**12 Spektrogramm**
Klonembryos · Alzheimer-Therapie · Blinde Fische · Proto-Spiralgalaxien · Urzeitlicher Panzerwurm u. a.

**15 Bild des Monats**
Submarine Tankstelle

**16 Im Sog des Superhaufens**
Galaktischer Kannibalismus bedroht randständige Sternsysteme

**19 Molekulares Möbiusband**
Ringmolekül schaltet zwischen aromatischem und antiaromatischem Zustand

**21 Gemeinsam Tunneln**
Nur sich abstoßende Atome gelangen als Paar durch Potenzialbarrieren

**23 Schrittmacher für den Schlaf**
Wie das Hirn im Tiefschlaf das Tor zum Bewusstsein schließt

**25 Springers Einwürfe**
Ratschläge für China


## ASTRONOMIE & PHYSIK


**28 Flüssige Teleskopspiegel**
Astronomen setzen auf diese ungewöhnliche Technik – weil sie viel billiger ist und dank CCD-Chips konventionellen Teleskopen ernsthafte Konkurrenz macht

**38 ▶ Ein Physiker mit spukhafter Fernwirkung**
Der Wiener Forscher Anton Zeilinger im Gespräch über die Mysterien der Quantenphysik


## MEDIZIN & BIOLOGIE


**44 ▶ Wach und doch bewusstlos**
Mit neuartigen Hirnaufnahmen lassen sich das Wachkoma und seine Übergangsformen zum Bewusstsein jetzt besser diagnostizieren

**50 Wie rational sind Affen?**
Logisch im menschlichen Sinn scheinen andere Primaten oft nicht zu denken – auch wenn es äußerlich manchmal so wirkt


## WEITERE RUBRIKEN


5 Editorial:
Heiliger Respekt vor den Urvätern
10 Leserbriefe
11 Impressum
87 Im Rückblick
106 Vorschau

98 Rezensionen:
Theodor W. Hänsch (Hg.) – *100 Produkte der Zukunft*
Steven J. Brams – *The Presidential Election Game*
Vivienne Parry – *Der Tanz der Hormone*
Thea Derado – *Im Wirbel der Atome*
Michael Müller, Ursula Fuentes und Harald Kohl (Hg.) – *Der UN-Weltklimareport*


*Titelmotiv: Jean-François Podevin*

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

TITELTHEMA

## Masterplan für das Solarzeitalter

60

50

MEDIZIN & BIOLOGIE
Affen und Rationalität

72

MENSCH & GEIST
Rivalität im Land der Maya

## ERDE & UMWELT

TITEL

60 **Der Weg ins solare Zeitalter**
Die USA könnten bis 2050 von Ölimporten unabhängig werden

66 **Europas Energiewende?**
Gemeinsam mit unseren Nachbarn könnten wir unseren Strom binnen zwanzig Jahren aus erneuerbaren Energien gewinnen

## MENSCH & GEIST

72 ▶ **Machtkämpfe unter den Maya**
Die Gottkönige Calakmuls und Tikals rangen erbittert um die Vorherrschaft

ESSAY

80 **Was ist der Mensch?**
Der Konstanzer Wissenschaftsphilosoph Jürgen Mittelstraß über die biologische Formbarkeit des Menschen

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

84 **Es gibt mehr Mathe, als du denkst**
Das Jahr der Mathematik ist feierlich eingeläutet worden

## TECHNIK & COMPUTER

88 ▶ **Staufrei über die Datenautobahn**
Es klingt verrückt, könnte aber das Internet revolutionieren: Daten kommen schneller und sicherer ans Ziel, wenn man sie unterwegs bis zur Unkenntlichkeit vermischt

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

96 **Wie misst man Behaglichkeit?**
Bei Wärmezählern sorgen Chemie und Elektronik für eine gerechtere Kostenverteilung

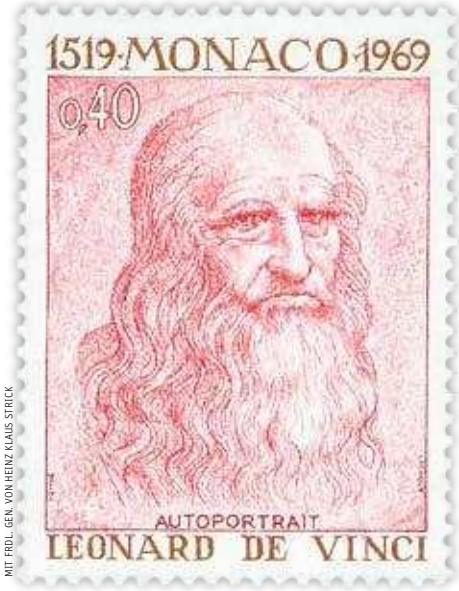
Thema der Woche

e·on
Neue Energie

# ONLINE

DRAGAN TRIFUNOVIC / FOTOLIA

FÜR ABONNENTEN »Dahinter steckt ein kluger Kopf« www.spektrum-plus.de




MIT FRDL. GEN. VON HEINZ KLAUS STRICK

TIPPS Große Mathematiker im Porträt
www.spektrum.de/monatskalender

FREIGESCHALTET »Quell des Lebens«
www.astronomie-heute.de/artikel/914126

## spektrumdirekt

Die Wissenschaftszeitung im Internet

### Schwarze Löcher

Was immer ihnen zu nahe kommt, wird zerrissen: Schwarze Löcher verleiben sich bereitwillig jegliche Materie ein, derer sie habhaft werden können. Doch das ist längst nicht alles: Für Astronomen bergen die Massezentren noch immer viele spannende Rätsel

www.spektrumdirekt.de/schwarzeloecher

### Kommunikation bei Mensch und Tier

Die Sprache gehört wohl zu den herausragendsten Eigenschaften des *Homo sapiens*. Die neuesten Erkenntnisse zur Biologie des gesprochenen und geschriebenen Worts hat **spektrumdirekt** für Sie zusammengestellt:

www.spektrumdirekt.de/sprache

## TIPPS

### Große Mathematiker im Porträt

Thales von Milet, Blaise Pascal, Isaac Newton, John von Neumann und viele andere: Für seinen Mathematischen Monatskalender verfasst Heinz Klaus Strick Kalenderblätter über berühmte Vertreter der Mathematik – und zwar über jene, denen zu Ehren eine Briefmarke erschien

www.spektrum.de/monatskalender

### Wo studieren?

Unser Internetportal **Spektrum campus** gibt Hilfstellungen bei der Suche nach dem richtigen Studiengang. Hier stellen Professoren und Studierende ihre persönlichen Ansichten zu den verschiedenen Themenbereichen vor und laden Sie zum Meinungsaustausch ein

www.spektrum-campus.de

## INTERAKTIV

### Ist Sonnenenergie unsere Zukunft?

Diskutieren Sie mit! In dieser Ausgabe auf S. 60 skizzieren drei Autoren Amerikas Weg in eine solare Zukunft. Ein Hirngespinst? Ein realistischer Plan? Oder gibt es bessere Alternativen? Chefredakteur Reinhard Breuer lädt Sie ein zur Diskussion:

www.wissenslogs.de/solargrandplan

### Feynman im Hörsaal

Der Hörsaal war für Richard Feynman ein Theater – und er selbst gab den Schauspieler. Aus der Vorlesung machte der große Physiker eine dramatische Vorstellung, die er mit einem regelrechten Feuerwerk an Ideen, Einsichten und neuen Konzepten abschloss. Richard Mischak über die Neuauflage der »Feynman Vorlesungen«:

www.spektrumdirekt.de/artikel/938758

## FÜR ABONNENTEN

### »Dahinter steckt ein kluger Kopf«

Was läuft in genialen Gehirnen anders als in den grauen Zellen von Dietrich Durchschnitt? Lange ein Rätsel – doch in den letzten Jahren konnten Mediziner und Hirnforscher einige Geheimnisse der Hochbegabung aufklären

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

## FREIGESCHALTET

### »Quell des Lebens«

Das Wasser legte einen weiten Weg durchs All zurück, bevor es unseren Planeten erreichte. Über seine lange Reise sammeln Forscher nun immer mehr Erkenntnisse

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **ASTRONOMIE HEUTE** UNTER

www.astronomie-heute.de/artikel/914126

### »Staub im Weltall«

Staubteilchen im Raum zwischen den Sternen behindern zwar die Sicht auf manches Himmelsobjekt. Ohne sie kämen wir jedoch auch nicht aus, denn sie beeinflussen die Geburt von Sternen und Planeten

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **STERNE UND WELTRAUM** UNTER

www.suw-online.de/artikel/941004

## Spektrum.de

Heftarchiv
www.spektrum.de/archiv

Spektrum Notizen
www.spektrum.de/notizen

Spektrogramm
www.spektrum.de/spektrogramm

Spektrum Tagebuch
www.spektrum.de/tagebuch

Spektrum zum Hören
www.spektrum.de/hoeren

Spektrum in die Schulen
www.spektrum.de/wis

Der Mathematische Monatskalender
www.spektrum.de/monatskalender

Leserbriefe
www.spektrum.de/leserbriefe

Newsletter
www.spektrum.de/newsletter

DIESE UND WEITERE RUBRIKEN FINDEN SIE AUF DER NAVIGATIONSLEISTE UNSERER HOMEPAGE

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

Wir züchten kleine $CO_2$-Fresser.

Für Ihre umweltfreundliche Energieversorgung gehen wir auch neue Wege und erforschen jetzt sogar Mikroalgen zum Schutz unseres Klimas. Warum Mikroalgen? Sie wachsen bis zu 30-mal schneller als zum Beispiel Raps oder Mais und schnelles Wachstum bindet viel $CO_2$. Deshalb hat E.ON jetzt zusammen mit der Stadt Hamburg den Bau einer Pilotanlage gestartet, in der Mikroalgen $CO_2$ als Nährstoff bekommen und es in energiereiche Biomasse umwandeln. Diese können wir wiederum zur Erzeugung von Biodiesel oder Bio-Erdgas nutzen. Die Mikroalgen binden also nicht nur $CO_2$, aus ihnen kann auch wieder Energie gewonnen werden.

Mehr zu E.ON und zu dieser Pilotanlage erfahren Sie unter www.eon.com

e·on
Neue Energie

## Gehirn analysiert Geräusche im Schlaf

Wie geschieht Bewusstsein?
Januar 2008

In diesem Artikel wird versucht, die Ergebnisse der Messungen am menschlichen Hirn zu analysieren. Es werden dazu auch Erfahrungen aus dem täglichen Leben herangezogen.

Frau Greenfields Meinung, dass nur die Quantität der Geräusche für das Aufwachen maßgeblich ist, kann ich aus eigener Erfahrung nicht nachvollziehen. Wie erklärt sich, dass man bei erheblichem Straßenlärm oder sogar bei heftigem Gewitter tief schläft, bei leisen, aber ungewohnten Geräuschen im Bruchteil einer Sekunde jedoch hellwach ist?

Der menschliche Organismus hat sich im Lauf der Evolution ein nicht schlafendes Sinnesorgan geschaffen, um den gegenüber Raubtieren kräftemäßig weit unterlegenen *Homo sapiens* vor Gefahren zu warnen. Deshalb schlafen wir bei bekannten, auch sehr lauten Geräuschen ruhig weiter. Andererseits kann schon das leise Knacken der Uhr, wenige Sekunden vor dem Alarm, den Schläfer wecken. Und was passiert eigentlich, wenn man sich vornimmt, zu einer bestimmten Uhrzeit aufzuwachen? Das funktioniert nämlich nach einiger Übung auch. Wie kommt da die große Menge Neuronen zusammen, die das Aufwachen bewirken sollen? Im Schlaf wahrgenommene Geräusche werden also offenbar im Gehirn analysiert oder zumindest unterschieden nach Gefahr oder keine Gefahr. Der dafür verwendete Algorithmus ist jedoch so einfach strukturiert, dass man nach dem Erwachen oft feststellt, dass man im Schlaf das beunruhigende Geräusch falsch eingeordnet hat.

**Nicht jeder braucht einen lauten Wecker zum Aufwachen.**

Jedenfalls ist nur die Qualität der wahrgenommenen Information für die Entscheidung maßgeblich: aufwachen oder weiterschlafen.

Wir können unser Gehirn an Messgeräte anschließen und Theorien über die Kurven aufstellen. In der modernen Hirnforschung können wir aber nur die elektromagnetischen und die chemischen Vorgänge beobachten. Solange wir nicht einmal eine blasse Ahnung haben, welche physikalischen Gesetze es dem menschlichen Hirn in Grenzsituationen ermöglichen, Informationen zielgerichtet auszusenden, ist das alles nicht viel mehr als ein Stochern im Nebel. Ob dabei Quanteneffekte, wie einige Wissenschaftler vermuten, eine Rolle spielen, konnte bisher nicht bestätigt werden.

Manfred Schlabbach, Berlin

## Verdammung der Sexualität

Die Kunst, den Zweifel auszuhalten, Januar 2008

Zu der Frage, wie sich Ideologien in Gehirne einbetonieren können, möchte ich folgende Hypothese wagen: Eng verbunden mit dem Fundamentalismus ist die Verdammung der Sexualität.

Kinder, die in einer sexualfeindlichen Atmosphäre aufwachsen, werden verunsichert, wenn sie ihre eigene Sexualität entdecken, und halten sie für eine Krankheit, die nur sie allein betrifft. Das natürliche Schamgefühl wird auf alles Geschlechtliche fixiert.

Schamgefühl haben alle Menschen, wenn sie gegen die Regeln der Gemeinschaft verstoßen. Aber nur bei Fundamentalisten ist sie auf Nacktheit und Sexualität bezogen. Für den Fundamentalismus ist die Verdammung der Sexualität sehr wichtig, denn wenn es gelingt, die Sexualität eines Menschen zu unterdrücken, dann ist er auch bereit, religiöse und politische Bevormundung zu akzeptieren. Fundamentalismus ist nicht nur verbunden mit Intoleranz, sondern auch extrem feindlich der Freiheit im Denken und im Handeln gegenüber. Das kann man auch in der Politik nachweisen: Politische Unfreiheit ist sehr oft mit der Unterdrückung der Sexualität verknüpft.

Obwohl die christlichen Fundamentalisten nur eine verschwindend kleine Minderheit sind, ist ihr Einfluss enorm und sie versuchen, im Namen aller Christen zu sprechen und zu handeln. Der christliche Fundamentalismus ist zurzeit mit dem jüdischen verbündet und der islamische Fundamentalismus ist seit der Gründung des Islam eine bedeutende Kraft und erhält in jüngster Zeit immer mehr Zulauf.

Heinz-Dieter Zutz, Bielefeld

**Antwort des Autors Martin Urban:**
Herr Zutz hat Recht, das Machtinstrument der Kirchen ist die Sexualmoral. Das verwundert nicht, wenn man im Zölibat leben lässt.

Die Körperfeindlichkeit hat eine alte christliche Tradition, insbesondere auch bei den evangelischen Fundamentalisten. Herr Zutz hat ebenfalls Recht, wenn er beschreibt, dass sich der Fundamentalismus nicht nur im Christentum, sondern gleicherweise im Judentum wie im Islam findet. Relikte aus einer archaischen, patriarchalischen Welt. Ich betone allerdings, dass es unsere Aufgabe ist, uns mit unserem, dem christlichen Fundamentalismus im intellektuellen Disput auseinanderzusetzen, und nicht, wie immer häufiger Politiker und Repräsentanten der Kirchen dies tun, mit dem Finger auf die fundamentalistischen Muslime zu zeigen.

Mir geht es nicht allein um eine verquere Sexualmoral. Vielmehr vor allem darum, die Bibel und die christlichen Rituale, insbesondere die Deutung des Todes Jesu und den Opferkult des Abendmahls, historisch-kritisch und zugleich auch mit dem Wissen der Naturwissenschaften zu analysieren. Das tun die Fachtheologen mit ihren Mitteln natürlich längst, wenn auch meist sehr vorsichtig, insbesondere wenn sie katholisch sind.

Aber die Kirchen tun dies nicht, sie nehmen diese Erkenntnisse nicht auf. Unaufgeklärte Christen aber können, das ist die Erfahrung der letzten Jahre in den USA, zu einer Gefahr für die Demokratie werden. Eben davor hat im Oktober 2007 der Europarat in einer Resolution die Europäer und speziell die Deutschen ausdrücklich gewarnt.

## Fachfremde Kritiker

Falsche Klimaskeptiker, Kommentar, Januar 2008

Obwohl auch ein Skeptiker, der sich seit über zehn Jahren mit diesem Thema aktiv beschäftigt, halte ich die in dem Kommentar vorgebrachten Einwände für berechtigt. Absolutisten und Polemiker schaden den sachlichen Aufklärungsbemühungen der Kritiker einer Hypothese, die Menschheit könne durch ihr Verhalten eine Klimakatastrophe auslösen. Wenn der Kommentator dann aber bemängelt, dass die Kritiker nicht einmal studierte Fachleute sind, sondern zum Beispiel nur Biologen, Lehrer und so weiter, dann kann ich ihm nicht folgen.

Auch Fachfremde können sich in ein neues Thema einarbeiten und ein Gespür für Ausreißer entwickeln. Häufig ist dafür nur gesunder Menschenverstand erforderlich. Als Ingenieur bringe ich beispielsweise die Fähigkeit zum analytischen Denken mit, muss aber nicht unbedingt die partiellen Differenzialgleichungen zur Beschreibung der atmosphärischen Zirkulation in den Klimamodellen nachvollziehen können. Es genügt schon, die Annahmen für diese Rechnungen kritisch unter die Lupe zu nehmen, um zu beurteilen, ob das Ganze realistisch oder monokausal aufgebaut ist. Und es ist – weil $CO_2$-fixiert – monokausal aufgebaut!

Ich möchte noch auf einen weiteren Punkt eingehen. Der Autor schreibt, dass in den vergangenen drei Jahrzehnten Änderungen der Sonnenaktivität wahrscheinlich nicht zur globalen Erwärmung beigetragen haben. Das sieht nun unter anderen Prof. Horst Malberg, ehemaliger Direktor des Instituts für Meteorologie der FU Berlin, ganz anders. In einem Artikel »Über den solaren Einfluss auf den Klimawandel seit 1701« vergleicht er den globalen Temperaturverlauf von 1851 bis 2000 mit der mittleren Sonnenfleckenzahl je Zyklus in diesem Zeitraum und weist ein gutes analoges Verhalten dieser beiden Parameter nach. Er schreibt dazu: »Eine quantitative statistische Korrelationsanalyse führt zu folgendem Ergebnis: Die gesteigerte solare Aktivität in den letzten 150 Jahren vermag zwei Drittel des globalen Temperaturverhaltens seit 1850 zu erklären. Dieser dominante solare Einfluss auf die globale Erwärmung ist durch eine statistische Wahrscheinlichkeit von 99 Prozent abgesichert.«

Gerd Zelck, Seevetal

**Antwort des Autors Sven Titz:**
Gewiss können sich Fachfremde in ein wissenschaftliches Thema einarbeiten und bohrende Fragen stellen, die hin und wieder auch Experten in Verlegenheit bringen. Da stimme ich Herrn Zelck im Prinzip zu. Allerdings ist es bei der Spezialisierung der modernen Naturwissenschaften für Außenseiter ganz schön schwer, einen hieb- und stichfesten Fachartikel zu verfassen.

Die Sache mit dem solaren Einfluss sehe ich ein klein wenig anders als Herr Zelck. Der Zusammenhang zwischen der Sonnenaktivität und dem Erdklima ist sicherlich erst teilweise geklärt. Vielleicht wird es in diesem Forschungsgebiet in den kommenden Jahren noch Überraschungen geben. Herr Prof. Malberg hat seine Studie jedoch nicht in einer anerkannten Fachzeitschrift veröffentlicht. Darum rate ich, seine Resultate mit dem gebührenden Maß an Reserviertheit zu betrachten. Man lese zum Beispiel auch den Artikel »Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature« von Mike Lockwood und Claus Fröhlich, der 2007 in den »Proceedings of the Royal Society« (Bd. 463, S. 2447) erschienen ist.

## Erratum

Elektronen mögen's heiß, Wissenschaft im Alltag, Februar 2008

Bei 40 Kilohertz wechselt die Polarität 80 000-mal pro Sekunde und nicht 40 000-mal, wie in der Bildlegende beschrieben. *Die Red.*

### Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Spektrum DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
**Stellvertretende Chefredakteure:** Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
**Redaktion:** Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer
**Schlussredaktion:** Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
**Art Direction:** Karsten Kramarczik
**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
**Redaktionsassistenz:** Eva Kahlmann, Ursula Wessels;
**Redaktionsanschrift:** Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
**Verlagsleiter:** Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck
**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Daniel Fischer, Dr. Markus Fischer, Dr. Gabriele Herbst, Lehrstuhl für Nachrichtentechnik, TU München, Claus-Peter Sesín, Dr. Sebastian Vogel.

**Leser- und Bestellservice:** Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
**Bezugspreise:** Einzelheft € 7,40/sFr 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten.
Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an.
Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
**Anzeigen:** GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls;
Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
**Anzeigenvertretung:** Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-150, Fax 030 6159005;
Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-184, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099;
Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555;
Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49;
München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
**Druckunterlagen an:** GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 29 vom 01.12.2007.

**Gesamtherstellung:** Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

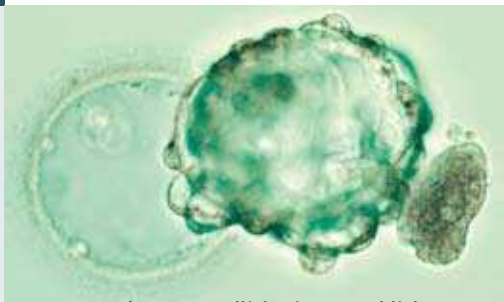
Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2008 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

**SCIENTIFIC AMERICAN**
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, President: Steven Yee, Vice President and Managing Director, International: Dean Sanderson, Vice President: Frances Newburg, Circulation Director: Christian Dorbrandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel



STEMAGEN

**Ist das nun endlich ein menschlicher Embryo, der durch Klonen erzeugt wurde?**

REPRODUKTIONSMEDIZIN

## Menschlicher Klonembryo, die zweite

■ Seit gut zehn Jahren bemühen sich Forscher in aller Welt, menschliche Klonembryonen zu schaffen, um daraus Stammzellen für therapeutische Zwecke zu gewinnen. Schon einmal schien es gelungen. Doch dann erwiesen sich die Erfolgsberichte des südkoreanischen Wissenschaftlers Hwang Woo-suk als frei erfunden.

Nun behaupten US-Forscher um Andrew French von der Firma Stemagen, einen menschlichen Embryo aus der Hautzelle eines Erwachsenen geklont zu haben. Deren Erbgut schleusten sie in 29 entkernte Eizellen drei junger Frauen. Fünf dieser manipulierten Oozyten teilten sich bis zum frühen Embryonalstadium. Unabhängige genetische Untersuchungen belegten, dass mindestens eine der dabei gebildeten Blastozysten mit dem Spender genetisch übereinstimmte. Es handelte sich demnach um einen frühen menschlichen Klon.

Eine kultivierbare Stammzelllinie erzeugten die Forscher daraus jedoch nicht. Das wirft ebenso Fragen auf wie die Tatsache, dass ihre Versuche schon eineinhalb Jahre zurückliegen und erst jetzt in einer eher unbekannten Zeitschrift veröffentlicht wurden. Und noch etwas ist verwunderlich: Die Forscher benutzten die gleiche Methode, mit der alle anderen vor ihnen gescheitert waren. Die einzige Erklärung für ihren Erfolg scheint, dass sie Zugang zu ganz frisch entnommenen Eizellen hatten.

*Stem Cells, Online-Vorabveröffentlichung*

GENETIK

## Blind + blind = sehend

■ Während seiner schon knapp eine Million Jahre dauernden Isolation in den tiefen, finsteren Höhlen entlang der mexikanischen Küste hat der Blinde Höhlensammler *(Astyanax mexicanus)* sein Sehvermögen eingebüßt. Anders als seine im Hellen lebenden Artgenossen verlässt er sich bei der Beutejagd nur noch auf seinen empfindlichen Geruchs- und Tastsinn. Die im Dunkeln nutzlosen Augen sind verkümmert.

Genetische Untersuchungen ergaben allerdings, dass die Blindheit bei Populationen, die sich in getrennten Höhlen unabhängig voneinander entwickelt haben, auf unterschiedlichen Mutationen beruht. Folglich sollten sich durch Vermischen des Erbmaterials die jeweiligen Mängel womöglich ausgleichen lassen. Richard Borowsky von der New York University kreuzte deshalb drei der 29 bekannten Populationen Blinder Höhlensammler untereinander und prüfte anschließend das reflexartige Verfolgen bewegter Objekte durch das Auge.

Tatsächlich reagierten 39 Prozent einer Gruppe von Hybriden auf Bewegungen im Gesichtsfeld. Diese Tiere hatten offenbar zumindest einen Teil ihres ursprünglichen Sehvermögens zurückgewonnen. Ihre Augen waren denn auch ungewöhnlich gut entwickelt, wenngleich viel kleiner als die ihrer Verwandten an der Wasseroberfläche. Bei den zwei anderen Gruppen fiel der Effekt deutlich schwächer aus: Der Anteil der partiell sehenden Hybriden lag hier nur bei acht beziehungsweise einem Prozent.

*Current Biology, Bd. 18, S. R27*

MASATO YOSHIZAWA UND WILLIAM JEFFERY, UNIVERSITY OF MARYLAND

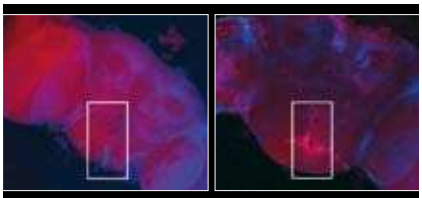
**Der Blinde Höhlensammler (unten) gehört zur selben Art wie der Süßwasserfisch *Astyanax mexicanus* (oben), hat aber durch das Leben im Dunklen seine Pigmentierung und das Augenlicht verloren.**

ALTERN

## Neuer Ansatz zur Alzheimer-Therapie

■ Im Gehirn kann die Anhäufung schädlicher Proteinablagerungen Nervenzellen zerstören und schlimmstenfalls neurodegenerative Krankheiten wie die Alzheimer-Demenz auslösen. Mit den Autophagosomen beschäftigen die Zellen deshalb eigene Aufräumkommandos, die Proteinmüll beseitigen, indem sie ihn umschließen und an »Lysosomen« weiterreichen, in denen er enzymatisch abgebaut wird.

Warum kommt es trotzdem zu neurodegenerativen Erkrankungen? Wissenschaftler um Kim Finley vom Salk Institute in San Diego (Kalifornien) stellten bei Untersuchungen an Taufliegen fest, dass die Truppe der Müllbeseitiger im Lauf des Lebens zusammenschmilzt. Dadurch stapeln sich mit dem Alter die Proteinablagerungen.



KIM FINLEY, SALK INSTITUTE

**Anders als bei einer normalen Taufliege (links) haben sich im Gehirn eines Tiers mit unterdrückter zellulärer Müllbeseitigung (rechts) schon im Alter von 15 Tagen Ablagerungen defekter Proteine (rot angefärbt) gebildet.**

Das zeigten die Forscher am Beispiel von Atg8a, einer Komponente der Autophagosomen, die für deren Bildung essenziell ist. Wurde die Herstellung dieser Substanz unterdrückt, erschienen schon nach etwa zwei Wochen im Hirn der Fliegen Verklumpungen, die denen von Alzheimer-Kranken ähnelten. Bei den Kontrolltieren geschah das erst nach vier Wochen.

Hielten die Forscher aber den natürlichen Rückgang in der Konzentration von Atg8a auf, erledigten die Räumkommandos ihre Arbeit auch noch im hohen Alter, und die Lebenserwartung der Fliegen stieg. Das eröffnet einen viel versprechenden neuen Ansatz zur Therapie neurodegenerativer Erkrankungen, deren Zunahme sich bei steigender Lebenserwartung in unserer Gesellschaft zu einem ernsten Problem entwickelt.

*Autophagy, Bd. 4, S. 176*

ÖKOLOGIE

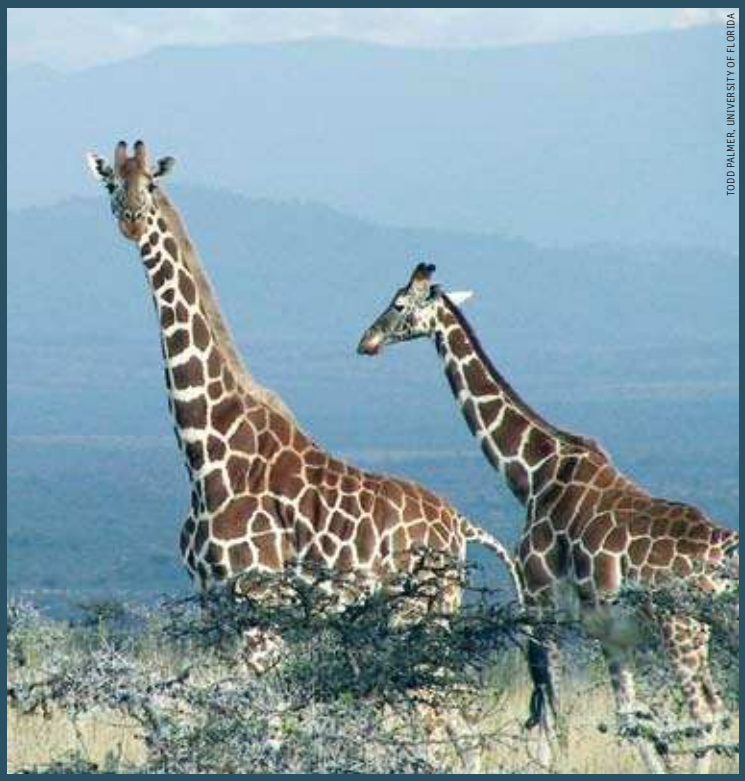
## Lebenswichtige Feinde

■ Giraffen und Elefanten prägen die afrikanischen Savannen. Ihr ungeheurer Appetit macht auch vor dornenbewehrten Pflanzen wie Akazien nicht Halt. Diese halten sich zur Verteidigung deshalb Heerscharen verbündeter Ameisen, die den hungrigen Vegetariern kräftig zusetzen. Im Gegenzug produzieren die Mimosengewächse reichlich nahrhaften Nektar und gewähren den Ameisen Unterschlupf in Domatien, hohlen Wohnräumen in den angeschwollenen Nebenblattdornen.

Doch was, wenn der gemeinsame Feind plötzlich ausbleibt? Ein Team um Todd Palmer von der Universität von Florida in Gainesville untersuchte Flötenakazien in Westkenia, die seit zehn Jahren durch Zäune vor Pflanzenfressern geschützt sind. Zur Überraschung der Forscher befanden sich die derart behüteten Bäume in einem wesentlich schlechteren Zustand als frei zugängliche Exemplare. Warum?

Offenbar hatten die Akazien die Koalition mit den Ameisen aufgekündigt. Da sie den Schutz der Insekten nicht mehr zu brauchen schienen, bildeten sie weniger Domatien und drosselten die Nektarproduktion. In der Folge schrumpfte die Population ihrer Verteidiger. Das Regiment übernahm eine Ameisenart, die den Baum nur als Wohnplatz, nicht jedoch als Nahrungsquelle nutzt. Sie schützt die Akazien dafür aber auch nicht gegen ihre großen sowie insbesondere kleinen Feinde – darunter spezielle Käfer, die den Stamm anbohren. So werden die Pflanzen besonders anfällig, und ihr Wachstum verlangsamt sich um zwei Drittel.

*Science, Bd. 319, S. 192*



TODD PALMER, UNIVERSITY OF FLORIDA

**Werden Akazien (Vordergrund) vor großen Säugetieren wie Giraffen geschützt, gedeihen sie paradoxerweise wesentlich schlechter.**

ERSATZORGANE

## Tote Herzen wiederbelebt

■ Spenderherzen sind Mangelware. Patienten müssen deshalb oft Jahre auf eine lebensrettende Transplantation warten. Nach der Operation sind sie zudem auf eine lebenslange medikamentöse Immunsuppression angewiesen, damit ihr Körper das fremde Organ nicht abstößt. Eine Lösung für beide Probleme böten maßgeschneiderte Ersatzorgane aus dem Labor.

Bei deren Entwicklung ist Forschern um Doris Taylor von der Universität von Minnesota in Minneapolis nun ein großer Erfolg gelungen. Mittels einer speziellen Chemikalienlösung streiften sie sämtliche Zellen von zuvor entnommenen Herzen toter Ratten ab. Zurück blieb nur ein transparentes Gerüst aus Kollagen, Laminin und Fibronectin. Dieses besiedelten die Forscher mit den Herzzellen neugeborener Ratten und pumpten dann eine Flüssigkeit in rhythmischen Abständen durch das Gebilde, um die Arbeit des Organs zu simulieren. Tatsächlich begann das Herz nach vier Tagen wieder zu schlagen. Nach einer Woche erreichte es sogar eine Pumpleistung, die etwa zwei Prozent des Normalwerts entsprach.

Damit konnte ein totes Herz erstmals wieder zum Leben erweckt werden – wenngleich seine Effizienz sehr gering blieb. Sofern sich diese Ergebnisse deutlich verbessern und auf den Menschen übertragen lassen, erschließen sie eine neue mögliche Quelle für Ersatzorgane, die zudem nicht vom Körper abgestoßen würden. Dazu wäre allerdings der Einsatz von Stammzellen des Patienten erforderlich, während Taylors Gruppe mit bereits ausdifferenzierten Zellen arbeitete.

*Nature Medicine, Online-Vorabveröffentlichung*

**Forscher eluierten alle Zellen aus einem toten Rattenherz, besiedelten es mit Herzzellen neugeborener Tiere und brachten es wieder zum Schlagen (von links nach rechts).**

THOMAS S. MATTHIESEN, UNIVERSITY OF MINNESOTA

NASA / ESA / PSU, CARYL GRONWALL

**Zwölf Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt sind diese frühen, relativ kleinen Sternsysteme, die als Vorläufer von Spiralgalaxien in Frage kommen.**

ASTRONOMIE

## Vorläufer von Spiralgalaxien entdeckt

■ Die heutigen Galaxien sind das Ergebnis von Zusammenstößen und Verschmelzungen kleinerer Sternsysteme. Je nach ihrer Vorgeschichte unterscheiden sie sich im Aussehen. So ist unsere Milchstraße eine flache Scheibe mit ausladenden Spiralarmen. Andere Galaxien haben die Form von Ellipsen oder weisen einen zentralen Balken auf.

Die Entstehung der ersten solchen Welteninseln ist noch mit vielen Fragezeichen behaftet. Zwar wurden schon mögliche Vorläufer beobachtet. Sie sind jedoch so massereich, dass bei ihrer Kollision nur elliptische Galaxien entstehen konnten. Die Bildung von Spiralarmen erfordert laut Theorie dagegen die Kollision mehrerer Sternsysteme mit deutlich geringeren Massen.

Bei der gezielten Analyse von mindestens zwölf Milliarden Jahre alten Strahlungsquellen im Kosmos fand ein Team um Caryl Gronwall von der Pennsylvania State University in University Park nun etliche frühe Sternsysteme, die wesentlich kleiner als heutige Galaxien sind. Sie haben nur rund ein Zehntel des Durchmessers und ein Zwanzigstel der Masse unserer Milchstraße. Außerdem beherbergen sie vierzigmal weniger Sterne. Demnach könnte es sich tatsächlich um die gesuchten Vorläufer von Spiralgalaxien handeln. Dafür sprechen auch Aufnahmen von ihnen mit dem Hubble-Weltraumteleskop: Darauf ist zu erkennen, dass etliche dieser Sternsysteme – teils mehr als zehn – offenbar gravitativ aneinandergebunden sind, sodass sie später verschmolzen sein dürften.

*Pressemitteilung der Rutgers-Universität*

VERHALTEN

## Gewalt als Droge

■ Wenn Jugendliche auf ein wehrloses Opfer einprügeln, bereitet ihnen die Gewalt womöglich Lustgefühle wie Sex oder Drogen. Darauf deuten Experimente mit Mäusen hin, die Wissenschaftler um Craig Kennedy von der Vanderbilt University in Nashville (Tennessee) jetzt durchgeführt haben. Gewaltakte aktivieren demnach das Belohnungssystem im Gehirn der Tiere.

Für ihre Experimente hielten die Forscher Mäusepärchen in einem Käfig, wobei sie das Weibchen regelmäßig für kurze Zeit gegen eine Maus aus einer anderen Gruppe austauschten. Darauf reagierte der Hausherr stets böse und attackierte den unwillkommenen Gast. Dabei machte ihm diese Rauferei anscheinend Spaß. Konnte er per Druck mit der Schnauze auf einen Knopf den Gegenstand der Aggression in den Käfig zurückholen, nutzte er das ausgiebig.

Dinge, die wir gerne tun, aktivieren das Belohnungszentrum in unserem Gehirn. Dabei wird der Botenstoff Dopamin ausgeschüttet. War auch bei der Gewalt des Mäuserichs das Belohnungssystem beteiligt? Um das zu prüfen, verabreichte Kennedys Gruppe der streitlustigen Maus einen Hemmstoff, der die Dopaminrezeptoren blockierte.

Tatsächlich erlosch daraufhin deren Interesse an der Rauferei, während ihr sonstiges Verhalten unverändert blieb.

Die Ergebnisse könnten laut Aussage der Forscher die Faszination aggressiver Sportarten wie Boxen erklären. Bezogen auf Jugendgewalt, bedeuten sie unter Umständen, dass der Auslöser weniger aufgestaute Frustration als das Lusterlebnis ist, das die Ausübung von Gewalt verschafft.

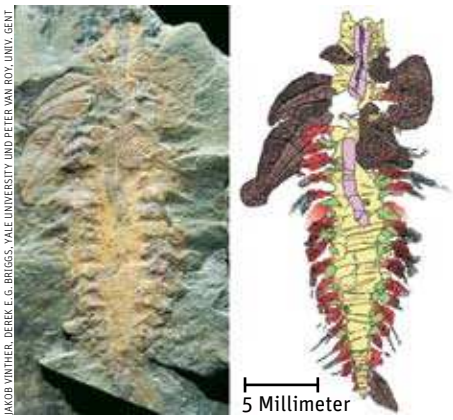
*Psychopharmacology, Online-Vorabveröffentlichung*

PALÄONTOLOGIE

## Panzerwurm aus der Urzeit

■ Im Jahr 1857 stießen Forscher in Ablagerungen auf die Abdrücke eines seltsamen Lebewesens. Es war vermutlich kaum größer als ein Fingernagel und trug einen länglichen Rückenpanzer aus Kalk.

Während des mittleren Paläozoikums bevölkerte das bizarre Geschöpf mit seinen Verwandten weltweit den Meeresboden. Bis heute blieb allerdings unklar, was für Tiere die Machaeridiae, wie sie genannt wurden, eigentlich waren. Nicht einmal der Stamm ließ sich bestimmen. Handelte es sich um Mollusken, Gliederfüßer oder Ringelwürmer? Abdrücke der schnell verfallenden Weichteile, die eine genauere Taxierung ermöglicht hätten, waren nirgends aufzufinden.




JAKOB VINTHER, DEREK E. G. BRIGGS, YALE UNIVERSITY UND PETER VAN ROY, UNIV. GENT

**Dieses 480 Millionen Jahre alte Fossil (links) enttarnte die rätselhaften Machaeridiae nun als Ringelwürmer. Es zeigt (Zeichnung rechts) den Rumpf (gelb), Kalkplatten (braun), Füßchen (rot) und Borsten (grau).**

Erst jetzt ließen sich die Familienverhältnisse endlich klären. Den Schlüssel lieferte ein neues Fossil aus dem Südosten Marokkos, das Paläontologen um Derek Briggs von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) entdeckt haben. Dem mit 480 Millionen Jahren ältesten Machaeridiae-Abdruck fehlt zwar der Kopf, doch lässt er erstmals den Körper des Tiers erahnen. Dieser besteht demnach wie bei Würmern aus zahlreichen Segmenten. Aus ihnen ragen seitlich jeweils paarweise mit Borsten bestückte Fortsätze heraus, die den beinartigen Parapodien der Ringelwürmer ähneln.

Vermutlich entstanden die Machaeridiae bei der »Explosion« der Tierwelt im Kambrium vor 540 Millionen Jahren. Warum sie allerdings im Unterschied zu all ihren heutigen Verwandten einen Panzer aus Kalkplatten trugen, ist noch ebenso rätselhaft wie der Grund ihres plötzlichen Verschwindens vor etwa 275 Millionen Jahren.

*Nature, Bd. 451, S. 185*

**Mitarbeit:** Christoph Marty

# Submarine Tankstelle

Vor acht Jahren wurde die »verlorene Stadt« am Grund des Atlantiks entdeckt: eine bizarre Ansammlung von Kalktürmen, aus denen mineralreiche Lösungen quellen. In dieser Bildmontage beleuchten zwei Tauchroboter den imposanten »Nature Tower«. Nun haben Forscher in den stark alkalischen Quellwässern große Mengen an Kohlenwasserstoffen gefunden, die im Unterschied zu gewöhnlichem Erdöl und -gas offenbar nicht biologischen Ursprungs sind. Das zeigt das völlig andere Verhältnis ihrer Kohlenstoffisotope. Vieles spricht dafür, dass die Verbindungen durch anorganisch-chemische Reaktionen zwischen Kohlendioxid und Wasserstoff entstanden, die bei der Umwandlung von Mineralen tief im Meeresboden frei werden. Sie könnten einst auch Rohmaterial für die ersten Organismen gewesen sein, die sich vermutlich an Tiefseequellen entwickelten.

DEBORAH KELLEY, MITCH ELEND, UNIV. WASHINGTON / IFE, URIJAO / NOAA UND DAS LOST CITY SCIENCE TEAM

ASTRONOMIE

# Im Sog eines Superhaufens

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

**Mit einem einzigartigen Datensatz erforscht ein internationales Astronomenteam die Schicksale der Mitglieder eines Galaxien-Superhaufens. Als besonders riskant erweist sich nach ersten Ergebnissen der Aufenthalt am Rand dieses Riesengebildes.**

Von Götz Hoeppe

Belästigung, Erstickung und Strangulation: Mit derlei drastischen Ausdrücken beschreiben Astronomen, was Galaxien in dicht bevölkerten Regionen des Kosmos widerfahren kann. Solche Ballungszentren gibt es vor allem in Galaxienhaufen. Dort haben sich im Schwerefeld von Verdichtungen der so genannten Dunklen Materie Hunderte bis Tausende von Sternsystemen angesammelt.

Die Lebenswege von Galaxien in den dicht besiedelten Randzonen dieser Haufen unterscheiden sich deutlich von denen im Innern. Das wissen die Astronomen bereits seit drei Jahrzehnten. So entdeckten schon 1978 Harvey Butcher, damals am Kitt Peak National Observatory bei Tucson (Arizona), und Augustus Oemler von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut), dass Galaxien in den Haufenzentren eher rot, im Außenbereich dagegen blau erscheinen.

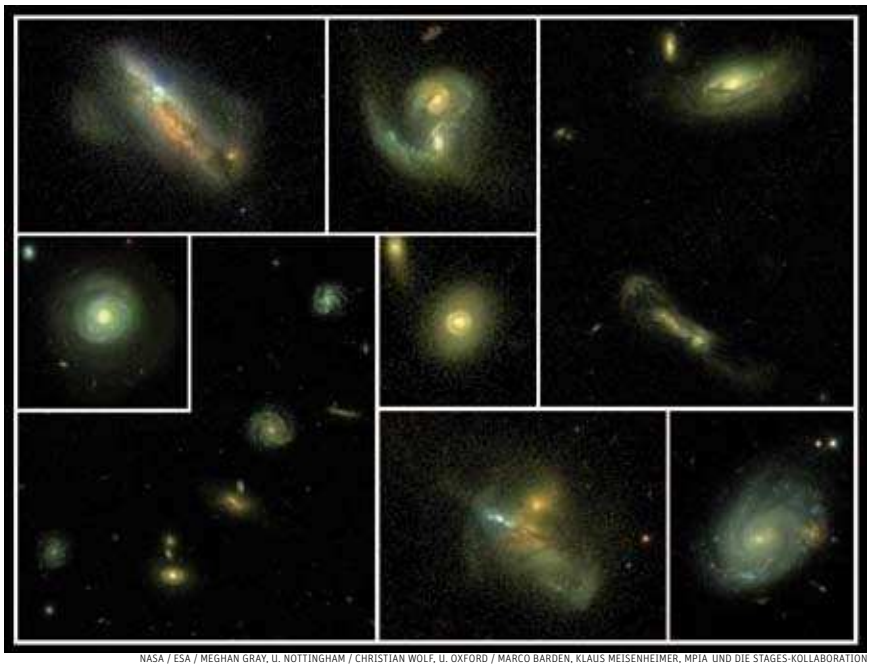
Hinter diesen Farbnuancen verbirgt sich ein Altersunterschied: Das Licht von jungen Sternpopulationen ist blau, das von bejahrten hingegen rot. Demnach bilden sich in zentrumsnahen Galaxien kaum noch neue Sterne. Tatsächlich gibt es dort oft auch nicht mehr viel Gas, das als Baumaterial für weitere Sterngenerationen in Frage käme. Besonders gilt das für nahe Galaxienhaufen, die sich schon relativ weit entwickelt haben. Ferne Exemplare, die wir in einem früheren Stadium ihrer Entwicklung sehen, enthalten im Zentrum dagegen noch mehr blaue Galaxien.

## Galaktischer Kannibalismus

Auch die Form der Sternsysteme divergiert zwischen innen und außen. Im Zentralbereich tummeln sich zumeist relativ strukturarme elliptische Vertreter, während in den Außenbezirken Spiralgalaxien dominieren. Diese »Morphologie-Dichte-Relation« hat Alan Dressler von den Hale-Observatorien in Pasadena (Kalifornien) schon 1980 entdeckt.

Astronomen deuten solche Zusammenhänge heutzutage im Rahmen von kosmologischen Computersimulationen. Denen zufolge begann sich die Dunkle Materie bereits unmittelbar nach dem Urknall – ausgehend von kleinen Dichteschwankungen – unter dem Einfluss ihrer eigenen Gravitation regional zusammenzuballen. In diese Bereiche erhöhter Materiedichte strömte dann, von deren Schwerkraft angezogen, die aus Atomen bestehende »baryonische« Materie. So entstanden Galaxien und Sterne. Besonders tiefe Gravitationspotenziale wurden zu Keimzellen von Galaxienhaufen. Bis heute stürzen Sternsysteme aus der Umgebung dort hinein.

Auf ihrem Weg erleiden sie dabei allerlei Unbill. So können sie durch das Schwerefeld naher Galaxien »belästigt« werden. Manchmal aber kollidieren und verschmelzen sie auch mit diesen Nachbarn (»galaktischer Kannibalismus«). Außerdem kann beim Eintauchen in das heiße Plasma des Haufens der Gegenwind aus den Galaxien einen Teil des kalten, interstellaren Gases im Inneren solcher ins Zentrum stürzenden Sternsysteme davonblasen, was die Forscher Ram Pressure Stripping nennen. Den



NASA / ESA / MEGHAN GRAY, U. NOTTINGHAM / CHRISTIAN WOLF, U. OXFORD / MARCO BARDEN, KLAUS MEISENHEIMER, MPIA UND DIE STAGES-KOLLABORATION

**Diese Hubble-Aufnahmen lassen erkennen, dass viele Galaxien am Rand des Superhaufens Abell 901/902 auffällig verformt sind. Dazu gehören aufgeweitete Scheiben von Spiralgalaxien (oben links) und so genannte Gezeitenschwänze (oben Mitte und oben rechts). Letztere gelten als Hinweis auf Wechselwirkungen der Sternsysteme untereinander sowie mit dem intergalaktischen Medium des Haufens. Da die Hubble-Aufnahme nur ein Farbband umfasst, wurden die Galaxienfarben aus Beobachtungen mit dem Zwei-Meter-Teleskop der Europäischen Südsternwarte (Chile) ergänzt.**

NASA / ESA / CATHERINE HEYMANS, UBC / MEGHAN GRAY, U. NOTTINGHAM / MARCO BARDEN, MPIA UND DIE STAGES-KOLLABORATION

**Das sichtbare Licht aus der Region um die Galaxienhaufen Abell 901 und 902 ist hier mit der Verteilung der Dunklen Materie (violett) überlagert, die aus den Bildern des Weltraumteleskops Hubble rekonstruiert wurde. Neben wenigen Sternen sind auf den Hubble-Aufnahmen mehrere zehntausend Galaxien erkennbar. Die Dunkle Materie konzentriert sich auf vier Strukturen (siehe Ausschnitte am Rand).**

Verlust der heißen Gashülle bezeichnen sie hingegen als Strangulation. Viele Galaxien sind außerdem von kaltem Gas umgeben, das sie als Baumaterial für weitere Sterne verwenden. Wird dieses abgetrennt, sprechen Astronomen von »Ersticken«. Welcher dieser theoretisch möglichen Prozesse dominiert, ist bis heute unklar.

Tiefere Aufschlüsse erhoffen sich die Mitglieder der Kollaboration Stages. Das Akronym steht für »Space Telescope A901/902 Galaxy Evolution Survey« und verrät, worum es diesem Team von etwa vierzig Astronomen aus acht Ländern geht: mit Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble zu untersuchen, wie sich die Sternsysteme im Umkreis jenes Galaxien-Superhaufens entwickeln, der aus den beiden Komponenten A901 und A902 besteht und sich zwei Milliarden Lichtjahre von uns entfernt im Sternbild Löwe befindet.

Seine zwei Bestandteile wurden erstmals im Abell-Katalog aufgeführt: einer Liste von 2712 Objekten, die George Abell in den 1950er Jahren auf Fotoplatten der Himmelsdurchmusterung der Mount-Palomar-Sternwarte (Kalifornien) identifizierte. Die unscheinbaren Gebilde fanden zunächst kaum Beachtung. Das änderte sich freilich in den 1990er Jahren, als Messungen des Satelliten Rosat verrieten, dass sich in ihrer Richtung vier ausgedehnte Quellen heißer Röntgenstrahlung befinden. Demnach mussten A901 und A902 sehr massereiche Galaxienhaufen sein. Gleich zwei davon in so geringem Winkelabstand am Himmel vorzufinden, weckte den Verdacht, dass sie womöglich miteinander verschmelzen. Das war der erste Hinweis, dass es sich um einen der seltenen Superhaufen handelt.

Zwischen 1999 und 2002 fotografierten Wissenschaftler um Klaus Meisenheimer und Christian Wolf vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg die Region um A901 und A902 mit einem Zwei-Meter-Teleskop der Europäischen Südsternwarte auf dem Berg La Silla (Chile) durch 17 Farbfilter. So gelang es, die spektralen Eigenschaften und die Entfernungen von etwa 10000 Galaxien in einem Himmelsausschnitt von der Größe des Vollmonds zu bestimmen.

Beide Forscher sind Gründungsmitglieder der Stages-Kollaboration, die Meghan Gray von der Universität Nottingham (England) leitet. Inzwischen verfügt das Team auch über Röntgenaufnahmen des Satelliten XMM-Newton von der Himmelsregion. Hinzu kommen ein Infrarotbild des Weltraumteleskops Spitzer, Ultraviolettaufnahmen des Satelliten Galex und spektroskopische Beobachtungen von Bodenteleskopen in Chile und Australien. Besonders ergiebig ist jedoch ein neues Mosaik aus achtzig Aufnahmen der Kamera ACS an Bord von Hubble.

Darauf lassen sich mehr als 60000 lichtschwache Galaxien im Hintergrund von A901 und A902 erkennen. Deren Bilder sind über den Himmelsausschnitt systematisch verzerrt – eine Folge des schwachen Gravitationslinseneffekts, der sich aus Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie ergibt. Dem Stages-Mitglied Catherine Heymans von der Universität von Britisch-Kolumbien in Vancouver (Kanada) gelang es, aus den Verzerrungen eine Karte des Gravitationspotenzials in der Haufenregion zu erstel-

SDW
Aboanzeige

len. Es ist von der Dunklen Materie dominiert, von der die Region mehr als einhundert Milliarden Sonnenmassen enthält *(Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, im Druck)*.

### Verräterische Gezeitenschwänze

Diese Karte bestätigte zunächst einmal, was zu erwarten war: dass sich die hellsten Galaxien im Superhaufen an den Stellen befinden, wo die Dunkle Materie am stärksten konzentriert ist. Außerdem aber zeigen sich bislang unbekannte Strukturen. So weist die Dunkle-Materie-Verteilung von A901 in Richtung einer von heißem Plasma umgebenen Galaxiengruppe eine Ausbuchtung auf. Die Forscher werten dies als Hinweis darauf, dass die sichtbare Materie entlang einer fadenartigen Struktur der Dunklen Materie in den Haufen einfällt – genau wie Computersimulationen das vorhersagen.

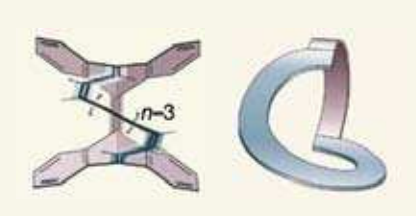
Nachdem sich die Teammitglieder mit Heymans' Karte sowie den Röntgenaufnahmen einen Überblick über die Untersuchungsregion verschafft haben, wollen sie nun genauer ergründen, wie einzelne Galaxien von ihrer Umgebung geprägt werden. Dafür bestens geeignet sind die detailreichen Hubble-Aufnahmen, auf denen viele Sternsysteme Störungen aufweisen. Dazu zählen vor allem so genannte Gezeitenschwänze, die als Hinweis auf die Verschmelzung von Galaxien gelten.

Diese Strukturen treten besonders zahlreich in den Randbereichen von A901 und A902 auf. Die Galaxien dort spüren offenbar die Sogwirkung aus den Zentren, bewegen sich aber noch so gemächlich, dass genug Zeit für Wechselwirkungen mit Nachbarn bleibt. Ähnlich wie in einem Mückenschwarm sind die Sternsysteme in den Zentren dagegen so schnell unterwegs, dass sie seltener zusammenstoßen. In diesen Regionen dominiert das Schwerefeld des Haufens über die direkte Anziehung zwischen zwei Galaxien, sodass sie sich leichter verfehlen und einander weit gehend in Ruhe lassen.

**Götz Hoeppe**, ehemals Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft, forscht als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Konstanz über die Soziologie internationaler Forschungskollaborationen.

CHEMIE 🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

# Molekulares Möbiusband mit Kippschalter




D. AJAMI ET AL., NATURE BD. 426, S. 820

**Das 2003 erzeugte erste molekulare Möbiusband (links) besteht im Prinzip aus einer aufgeschnittenen Unterlegscheibe, deren aufgebogene Enden durch einen seitlich angebrachten Rundbogen verbunden sind (rechts).**

Ein jüngst hergestelltes Molekül kann sich je nach den äußeren Bedingungen zu einem Möbiusband verdrillen oder einen glatten Ring bilden. Damit lassen sich theoretische Konzepte für aromatische Verbindungen testen.

Von Michael Groß

Ein Möbiusband, das werden die Mathematikbegeisterten unter Ihnen bereits wissen, hat nur eine Oberfläche und eine Kante. Man kann es leicht aus einem Papierstreifen herstellen, indem man ihn zum Ring biegt und eines der Enden vor dem Zusammenkleben um 180 Grad dreht. Ein nicht verdrilltes, geschlossenes Band besitzt dagegen zwei Oberflächen – eine innere und eine äußere – sowie zwei Kanten – eine obere und eine untere.

Auch Chemiker haben ein Faible für geometrische Figuren und bauen sie gern mit Molekülen nach. Meist ist das allerdings weniger Spielerei als Prüfstein hoher Synthesekunst. Zudem gibt ein solcher Nachbau oft Aufschluss über die Grenzen der Bindungsfähigkeit von Atomen. Manchmal ermöglicht er auch den Test theoretischer Konzepte.

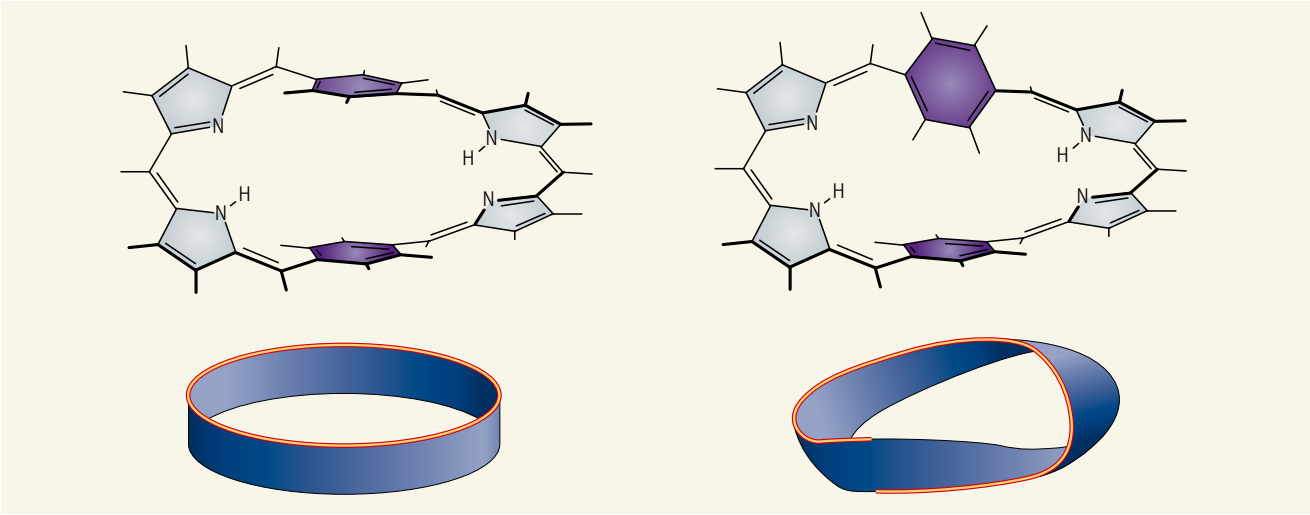
Das gilt zum Beispiel für das unlängst hergestellte molekulare Möbiusband. In diesem Fall geht es um grundsätzliche Einblicke in die Natur so genannter aromatischer Verbindungen. Sie enthalten einen Ring – gewöhnlich aus Kohlenstoffatomen –, in dem frei bewegliche Elektronen so gut wie ungehindert kreisen können. Das verleiht der Struktur eine besondere Stabilität.

### Aromatische Carrerabahnen

Für aromatische Moleküle gilt eine Regel, die der Marburger Physiker Erich Hückel schon 1931 aufgestellt hat. Danach muss die Zahl der beweglichen Elektronen immer $4n+2$ betragen. Für $n=1$ erhält man die sechsgliedrigen Exemplare Benzol und Pyridin. Unter den größeren Ringen finden sich bei $n=4$ die Porphyrine, die zum Beispiel eine wichtige Rolle im Hämoglobin und Chlorophyll spielen.

Die Hückel-Regel lässt sich mit quantenmechanischen Rechnungen begründen und ist vielfach experimentell belegt. Die Molekülorbitale, in denen sich die $4n+2$ Elektronen bewegen, sind im Prinzip ein kreisförmiges Band – wie die Schienen einer Carrera- oder Modelleisenbahn. Aus den quantenmechanischen Betrachtungen ergibt sich aber eine weitere interessante Möglichkeit: Wenn es gelänge, die Carrerabahn der Elektronen zu einem Möbiusband zu verdrillen, dann sollte die Formel statt $4n+2$ auf einmal $4n$ lauten. In diesem Fall wären also Ringe mit vier, acht oder zwölf Elektronen aromatisch.

Allerdings ist es sehr schwierig, ein aromatisches System zu verdrillen, ohne dabei einen scharfen Knick einzuführen, an dem die freie Bewegung der Elektronen enden würde. Die 180-Grad Wende muss so langsam und graduell ausgeführt werden, dass von einem Atom zum




NATURE BD.450, S. 37

**Ein Porphyrinring mit zwei eingefügten Benzolringen bildet ein System, das sich je nach umgebendem Medium zu einem molekularen Möbiusband verdrillen kann. In unpolaren Lösungsmitteln liegt eine planare Struktur mit zwei getrennten Oberflächen und Rändern vor (links). In polaren Lösungsmitteln kippt dagegen ein Benzolring (violett) in die Senkrechte und schafft so einen Übergang zwischen Ober- und Unterseite sowie Außen- und Innenkanten (rechts).**

nächsten immer die Illusion einer ebenen Rennstrecke erhalten bleibt.

Deshalb ist es Chemikern erst vor wenigen Jahren gelungen, ein solches Möbius-Molekül herzustellen. Die Arbeitsgruppe von Rainer Herges an der Universität Kiel zerschnitt im Prinzip die kreisförmige Carrerabahn, bog die Enden auf und verband sie mit einem seitlich eingesetzten Rundbogen (Bild S. 19). Dabei zeigte sich, dass bei $4n$ Elektronen ein solches Möbiusband stabiler ist als das analoge unverdrillte Molekül. Den Grund dafür sahen die Forscher im aromatischen Charakter dieser Ringstruktur.

## Lösungsmittel als Schalthebel

Nun haben Lechosław Latos-Grażyński und seine Mitarbeiter an der Universität Wrocław (Breslau) ein molekulares Band hergestellt, das man zwischen einer normalen Hückel- und einer verdrillten Möbius-Form umschalten kann, ohne es ganz durchschneiden zu müssen. Auf unser Papiermodell übertragen, verläuft in der Mitte des Streifens gewissermaßen ein Draht, der den Ring zusammenhält. Er dient dann als Achse, um die man nach einem beidseitigen Einschnitt des Papierstreifens die Enden gegeneinander verdrehen kann.

In der Welt der Moleküle setzten die Chemiker aus Polen dieses Konzept überraschend einfach um *(Angewandte Chemie, Bd. 46, S. 7869)*. Sie gingen von einem Porphyrinring aus, der mit 18 beweglichen Elektronen einen normalen Hückel-Aromaten darstellt. Diesen zerteilten sie in der Mitte und fügten an den beiden Schnittstellen jeweils einen Benzolring ein. Dadurch erhöhte sich die Gesamtzahl der Elektronen innerhalb der Rennstrecke auf 28. Die eingeführten Ringe sind um ihre Längsachse drehbar. Liegen sie mit dem Rest des Porphyrinmoleküls in einer Ebene, haben wir eine normale Carrerabahn. Dreht sich jedoch einer, wird daraus ein Möbiusband (Bild oben).

Die realen Verhältnisse sind allerdings etwas verzwickter; denn Ringe dieser Größe verzwirbeln sich oft zur Gestalt einer 8. An ihrer Topologie – Möbius oder Hückel – ändert das freilich nichts.

Bei der Röntgenstrukturanalyse von Kristallen des Moleküls erlebte das Team um Latos-Grażyński nun eine Überraschung: Einer der beiden Benzolringe hatte sich verdreht – und zwar genau so weit, dass es zu einem Seitentausch kam und die Bahn der Elektronen zu einem Möbiusband verdrillt war. Das ist ungewöhnlich, weil sich Aromaten üblicherweise flach übereinanderstapeln. In diesem Fall verhält es sich jedoch anders: Energetisch am günstigsten ist offenbar eine Anordnung, bei der nur einer der Benzolringe in der Ebene der 8 liegt, während der andere senkrecht dazu steht. Als Ursache kann man wiederum vermuten, dass das Möbiusband wegen seiner Aromatizität stabiler ist.

Aber welche Form nimmt der Ring an, wenn die Moleküle nicht im Kristall gefangen sind, sondern frei in einer Lösung herumschwimmen können? Aufschluss darüber gaben Untersuchungen mit der Magnetresonanzspektroskopie. Sie lieferten eine weitere Überraschung. Demnach hängt es vom umgebenden Medium und der Temperatur ab, ob der Ring verdrillt ist oder nicht. Kälte und polare Lösungsmittel wie Chloroform oder Dimethylformamid begünstigen die Möbius-Form, während in unpolaren Kohlenwasserstoffen bei Wärme bevorzugt die Hückel-Form vorliegt. Allein durch einen Wechsel der Bedingungen lässt sich also zwischen beiden umschalten.

In Einklang mit der Theorie erwies sich die Hückel-Form des Moleküls als nicht aromatisch. Das Möbiusband dagegen widersprach den Erwartungen: Das vorhergesagte aromatische Verhalten ließ sich nicht eindeutig nachweisen. Allerdings bietet das System Möglichkeiten zur Verbesserung – etwa durch Variation der Seitenketten, die an dem Ringmolekül befestigt sind. Ein Schalter für die Möbius-Topologie ist auf jeden Fall gefunden, jetzt müssen die Chemiker nur noch lernen, ihn mit dem nötigen Feingefühl zu bedienen.

**Michael Groß** hat sich schon im Vorschulalter im Labor von Siegfried Hünig an der Universität Würzburg mit aromatischen Verbindungen beschäftigt. Heute ist er nach Chemiestudium und Forschungstätigkeit in Biochemie freier Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

QUANTENPHYSIK

# Zu zweit durch den Tunnel

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

**Mainzer Forscher haben erstmals ultrakalte Atome beim gemeinsamen Tunneln durch eine Potenzialbarriere beobachtet. Vereint durch das Hindernis mogeln sich paradoxerweise vor allem Paare, die sich stark abstoßen – und gerade deshalb unlösbar aneinandergekettet sind.**

Von Robert Gast

Hannibals Heer wäre sicher gerne ein Quantenobjekt gewesen; dann hätte die Streitmacht des karthagischen Feldherrn im 2. Jahrhundert v. Chr. die Alpen überwinden können, ohne sich mit ihren schwerfälligen Elefanten über verschneite Gebirgspässe quälen zu müssen. Was für makroskopische Objekte ohne Bergbauerfahrung stets ein kühner Traum bleiben wird, ist im Reich der Kleinstteilchen nämlich gang und gäbe: Sieht sich ein von der Quantenmechanik beschriebenes Objekt einer unüberwindbaren Potenzialbarriere gegenüber, kann es mit einer endlichen Wahrscheinlichkeit einfach hindurchtunneln.

Auf diesem Kunststück beruhen viele physikalische Effekte wie der radioaktive Zerfall oder die Fusion zweier Atomkerne. Schon länger ist bekannt, dass aneinandergekoppelte Elektronen auch gemeinsam eine Energiehürde durchstoßen können. Auf diese Weise überwinden beispielsweise Cooper-Paare in supraleitenden Materialien einen isolierenden Josephson-Kontakt. Schwerere Teilchen ließen sich dagegen bisher nicht bei einem solchen Paartunneln beobachten. Erst jetzt hat es eine Mainzer Forschergruppe um Immanuel Bloch geschafft, auch Atome bei dem Vorgang zu ertappen *(Nature, Bd. 448, S. 1029)*. Es handelte sich sogar um besonders schwere Rubidiumatome, die gut 150000-mal so viel wiegen wie ein Elektron.

## Potenzialgitter aus Doppeltöpfen

Ausgangspunkt des Experiments war eine Wolke aus Zehntausenden dieser Teilchen bei extrem tiefen Temperaturen. Die Forscher bestrahlten sie mit diversen Lasern, deren Licht so interferierte, dass ein dreidimensionales Muster aus Potenzialtöpfen entstand. In ihnen sammelten sich die Atome. Durch geschickte Über-


## Exklusiv für Abonnenten

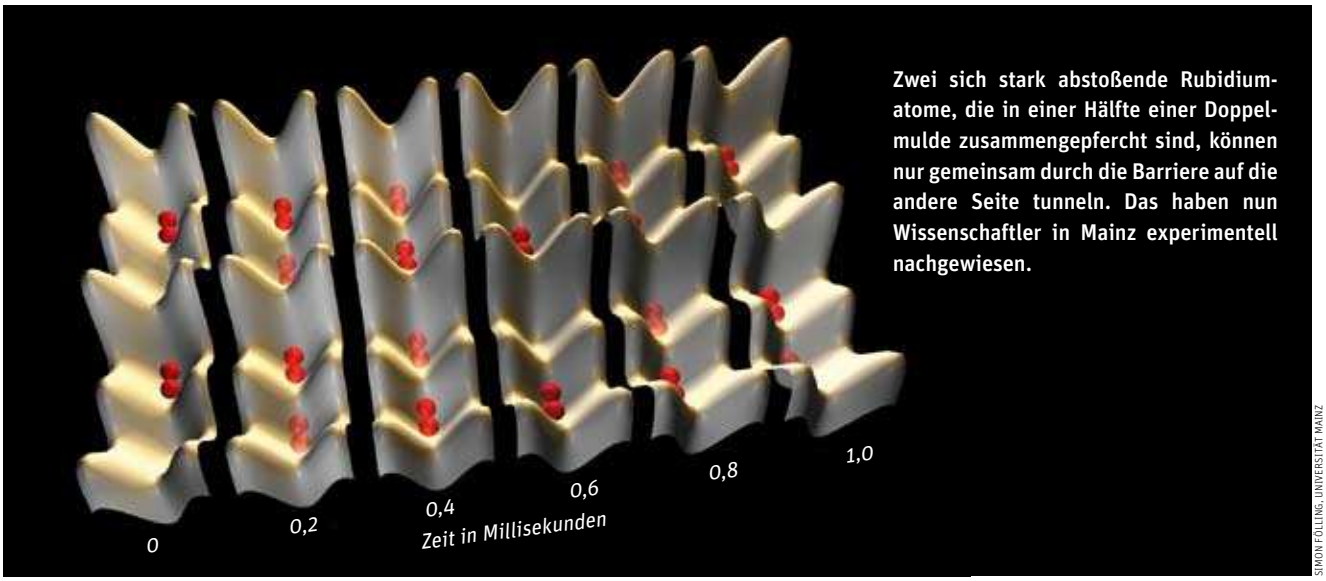
Ab sofort können Sie sich mit Ihrer Abonnentennummer unter **www.spektrum-plus.de** Ihren persönlichen Spektrum-Mitgliedsausweis herunterladen. Damit erhalten Sie Vergünstigungen bei den aufgelisteten Museen, Filmtheatern und wissenschaftlichen Einrichtungen:

Industriemuseum, Chemnitz / Neanderthal Museum, Mettmann / Auto & Technik Museum, Sinsheim / Technik Museum, Speyer / IMAX 3-D Filmtheater, Sinsheim / IMAX DOME, Speyer / Deutsches Dampflokomotiv-Museum, Neuenmarkt / Deutsches Hygienemuseum, Dresden / Deutsches Technikmuseum, Berlin / Zentrum für Multimedia, FH Kiel / Museum für Naturkunde, Magdeburg / Volkssternwarte und Planetarium, Recklinghausen / Urwelt-Museum Oberfranken, Bayreuth / Universum Science Center, Bremen / Deutsches Erdölmuseum, Wietze / Mathematikum, Gießen / Deutsches Museum, Bonn / Astronomisches Zentrum, Schkeuditz / Planetarium und Schulsternwarte, Herzberg / Planetarium, Freiburg / Turm der Sinne, Nürnberg / Urania, Berlin / Zeppelin-Museum, Meersburg / Nicolaus-Copernicus-Planetarium, Nürnberg.

Schauen Sie doch einfach im Internet, was Sie erwartet!

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

www.spektrum-plus.de




Zwei sich stark abstoßende Rubidiumatome, die in einer Hälfte einer Doppelmulde zusammengepfercht sind, können nur gemeinsam durch die Barriere auf die andere Seite tunneln. Das haben nun Wissenschaftler in Mainz experimentell nachgewiesen.

SIMON FÖLLING, UNIVERSITÄT MAINZ

lagerung der Strahlen modifizierten die Mainzer Forscher ihr optisches Gitter so, dass jedes Potenzialtal aus zwei Mulden bestand, die durch eine variierbare Energiebarriere getrennt waren. In diesen Doppeltöpfen landeten jeweils zwei ultrakalte Rubidiumatome.

Damit sie sich anfangs alle auf einer Seite befanden, kippten die Mainzer Forscher das Gitter kurz, indem sie die Laserwellen geringfügig gegeneinander verschoben. Dadurch erniedrigte sich die Energie einer der beiden Mulden, während die der anderen stieg. Die gefangenen Atome kullerten folglich alle in die tiefere Hälfte. Anschließend brachten die Forscher das Gitter wieder in die symmetrische Ausgangsposition und beobachteten, was geschah.

Um die Art und Häufigkeit von Tunnelprozessen festzustellen, ermittelten Bloch und seine Mitarbeiter zu verschiedenen Zeiten, auf welcher Seite der Barriere sich wie viele Atome befanden. Da die Doppelmulden etwas zu klein waren, um die Atome darin mit einem Mikroskop direkt sehen zu können, wurden die Teilchen in der einen Hälfte selektiv in Schwingung versetzt. Derart angeregt, verließen sie das Gitter nach dem Abschalten der Laser in eine andere Richtung als die nicht in Oszillation versetzten Atome. Nach einer gewissen Flugzeit entstanden so zwei getrennte Wolken, die man fotografieren konnte. Auf den Fotos ließen sich dann die Atome abzählen.

Als entscheidender Faktor für das Tunneln erwies sich die Stärke der abstoßenden Wechselwirkung zwischen den gefangenen Rubidium-Teilchen. Um sie zu variieren, änderten die Forscher die Intensität der einzelnen Laserstrahlen und verstellten so die Höhe der Barriere.

Bei niedriger Trennwand ist die Potenzialmulde größer und das Tunneln einfacher. In diesem Fall gehen beide Atome getrennte Wege und durchqueren die Barriere unabhängig voneinander – meist allein, manchmal aber auch zufällig gleichzeitig mit dem Partner, sei es in gleicher oder entgegengesetzter Richtung. Im Experiment zeigte sich dann, dass sich die Teilchen zu verschiedenen Zeiten mal auf beide Hälften des Potenzialtopfs verteilten und mal gemeinsam in der linken oder rechten Mulde aufhielten.

## Durch Abstoßung verbunden

Steigerten die Forscher die Abstoßung zwischen den Atompaaren, indem sie die Barriere erhöhten und für eine engere Mulde sorgten, geschah dagegen Seltsames. Nun befanden sich die zwei Teilchen, wann immer die Forscher nachsahen, stets gemeinsam in einer Mulde, und zwar abwechselnd in der linken oder der rechten. »Obwohl zwischen den beiden Atomen eine starke Abstoßung herrscht, trennen sie sich also nicht voneinander und tunneln keinesfalls einzeln. Wenn überhaupt, durchlaufen sie die Barriere nur gemeinsam«, erklärt Simon Fölling aus Blochs Forschungsgruppe das erstaunliche Ergebnis des Experiments.

Der Grund dafür ist verwandt mit einem Phänomen, das Forscher in Innsbruck vor zwei Jahren schon entdeckt haben. In gewisser Weise gleicht es der Hassliebe zwischen Ehepartnern, die sich in tiefer Abneigung verbunden sind. Genau betrachtet, hat es aber kein Analogon in der makroskopischen Welt – obwohl es auf einem vertrauten physikalischen Prinzip beruht: dem Energieerhaltungssatz. Zwar würde Energie frei, wenn sich die Atome trennen. Diese kann im Potenzialgitter aber nicht durch Prozesse wie Reibung abgeführt werden. Deshalb müssen die »durch Abstoßung verbundenen Paare« *(»repulsively bound pairs«)* notgedrungen zusammenbleiben. Das verhindert, dass sie einzeln tunneln, was sonst der dominierende Prozess wäre. Nur deshalb konnten die Mainzer Forscher das normalerweise viel unwahrscheinlichere Paartunneln beobachten.

Von praktischer Bedeutung dürfte allerdings ein anderes Ergebnis der Versuche sein. Wie Bloch und seine Mitarbeiter herausfanden, kann bei einer bestimmten asymmetrischen Verformung des Potenzialtopfs nur dann ein Rubidium-Teilchen von der flachen in die tiefe Mulde tunneln, wenn dort bereits ein Atom sitzt. Solch ein »Atomschalter« wäre ein wertvoller Bestandteil von Quantencomputern: jenen futuristischen Rechnern, die ihre heutigen Vorläufer bei manchen Aufgaben weit in den Schatten stellen sollen. Auf diese Weise könnte man die Teilchen in dem Gitter nämlich »verschränken« – also in jenen quantenmechanischen Überlagerungszustand versetzen, dem der Wunderrechner erst seine enorme Schnelligkeit verdankt.

**Robert Gast** ist freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

HIRNFORSCHUNG

# Schrittmacher für den Schlaf

**Computersimulationen bestätigen experimentelle Befunde, wonach sich die Großhirnrinde im Tiefschlaf vor störenden Signalen schützt, indem sie die Aktivität einer vorgelagerten Hirnregion gleichschaltet und so das »Tor zum Bewusstsein« vorübergehend schließt.**

Von Jörg Mayer

Wir Menschen verbringen etwa ein Drittel unseres Lebens mit Schlaf. Was passiert dabei mit uns? Erstaunlicherweise ist darüber trotz langjähriger Forschung sehr wenig bekannt. Während der Nacht wechseln wir mehrfach zwischen leichtem und tiefem Schlaf sowie Traumphasen. Diese verschiedenen Schlafstadien lassen sich anhand eines Elektroenzephalogramms (EEG) unterscheiden: einer Aufzeichnung der Spannungsschwankungen an der Kopfoberfläche. Dabei verrät sich der Tiefschlaf durch langsame Schwingungen mit einer Frequenz von etwa einem Hertz, deren Amplitude deutlich höher ist als im Wachzustand. Sie resultieren aus einem nahezu gleichzeitigen Wechsel von aktiven und inaktiven Zuständen fast aller Neuronen der Großhirnrinde (Kortex).

Aktuelle Experimente weisen darauf hin, dass der Tiefschlaf dabei hilft, sich Gelerntes dauerhaft zu merken. In ihm sichtet und bewertet das Gehirn die tagsüber aufgelaufenen Informationen und überspielt das Wichtige ins Langzeitgedächtnis. Vorraussetzung dafür ist, dass möglichst keine störenden Signale von anderen Hirnregionen eingehen.

Im Wachzustand liefert der Thalamus, eine Region im Zwischenhirn, den weitaus wichtigsten Input zum Kortex und nimmt so entscheidenden Einfluss auf dessen Aktivität. Fast alle sensorischen Informationen passieren diesen Hirnbereich, bevor sie bewusst wahrgenommen werden. Deshalb gilt der Thalamus auch als Tor zum Bewusstsein.

Aber wie ist die Situation im Tiefschlaf, in dem das Bewusstsein ausgeschaltet ist? Eine plausible, aber umstrittene Theorie besagt, dass sich dann die Verhältnisse umkehren und die Großhirnrinde mit ihren langsamen Schwingungen die thalamische Aktivität steuert. Dadurch verhindert sie, dass von dort weitere Informationen eingehen, die beim Auslesen und dauerhaften Abspeichern wichtiger Erinnerungen vom Tag dazwischenfunken.

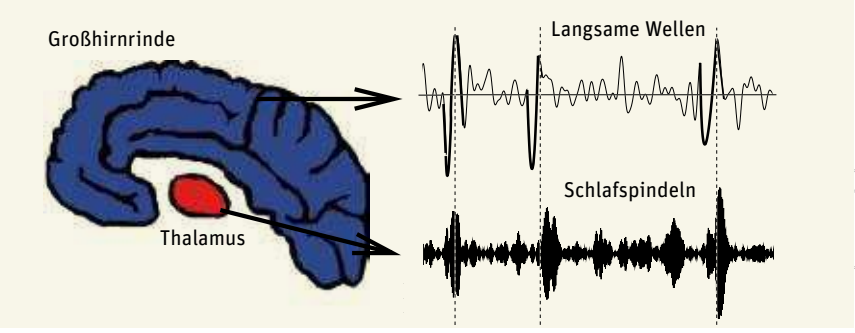
## Hirnrinde steuert Schlafspindeln

Zu dieser Theorie passen neuere experimentelle Befunde, wonach der Thalamus nicht essenziell an der Entstehung der Langsamen Wellen im EEG während des Tiefschlafs beteiligt ist. Vielmehr werden sie durch Wechselwirkungen zwischen den und Ionenströme in den Neuronen des Kortex allein ausgelöst, aufrechterhalten und beendet. Entsprechend bleiben sie auch nach dem Abtrennen des Großhirns vom Thalamus bestehen. Nur beim Kappen der Verbindungen innerhalb des Kortex brechen sie zusammen.

Anders verhält es sich mit den so genannten Schlafspindeln, die im Thalamus entspringen und im EEG während des Tiefschlafs gleichfalls zu erkennen sind. Es handelt sich um Wellen mit einer deutlich höheren Frequenz von 12 bis 15 Hertz, die etwa ein bis zwei Sekunden anhalten und im Abstand von rund vier Sekunden aufeinanderfolgen. Bei ihnen geht die Synchronisation verloren, wenn die Verbindung zum Großhirn gekappt wird. Dann pflanzen sich die Spindeloszillationen, die schon bei der Kopplung von nur zwei thalamischen Nervenzellen auftreten, als Wanderwellen von Neuron zu Neuron fort.

Die bisher überzeugendsten experimentellen Belege dafür, dass der Kortex beim Menschen im Tiefschlaf als Schrittmacher fungiert, hat Matthias Mölle vom Institut für Neuroendokrinologie in Lübeck vorgelegt. Er konnte in einer EEG-Studie zeigen, dass die langsamen Schwingungen der Großhirnrinde für die zeitliche Gruppierung der thalamischen Spindeln sorgen (Bild unten). Diese Synchronisation sollte den Informationsfluss durch den Thalamus stark drosseln und damit den Schutz des Schlafs vor äußeren Störungen gewährleisten.

Leider sind die experimentellen Möglichkeiten der Schlafforschung beschränkt. So ist es fast unmöglich, den Dialog zwischen Kortex und Thalamus nur selektiv in einer Richtung zu unterbrechen und die Folgen zu untersuchen. Gerade ein solches Experiment wäre für die hier betrachtete Fragestellung aber sehr aufschlussreich. Wo die Experimentierkunst am realen Objekt an ihre Grenzen stößt, können jedoch Simulationen




MATTHIAS MÖLLE, UNIVERSITÄT LÜBECK

**Die Langsamen Wellen *(slow waves)* der Großhirnrinde, die beim Tiefschlaf im Elektroenzephalogramm zu beobachten sind, gruppieren die thalamischen Spindeloszillationen. Diese treten, wie man klar erkennt, besonders intensiv nach einer negativen Halbwelle der *slow waves* auf. Dargestellt sind experimentelle Daten aus dem Schlaflabor der Arbeitsgruppe von Jan Born an der Universität Lübeck.**

am Computer weiterhelfen. Dort lassen sich beliebige Eingriffe vornehmen und ihre Auswirkungen durchspielen.

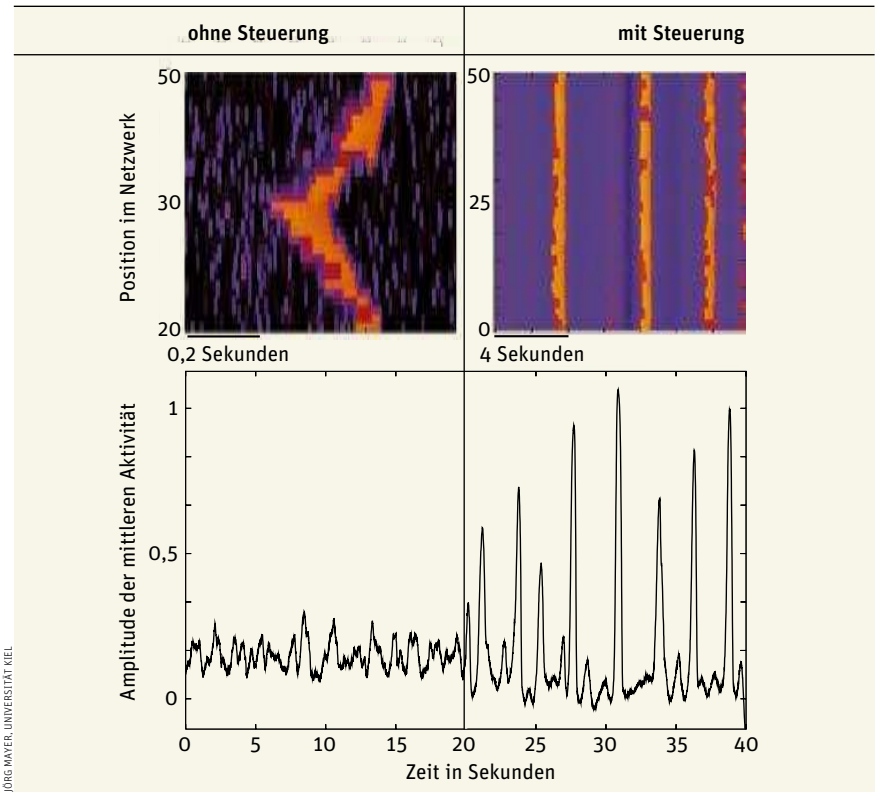
Deshalb haben meine Kollegen und ich in der Abteilung »Nichtlineare Dynamik« am Institut für theoretische Physik und Astrophysik der Universität Kiel ein Computermodell entworfen, das die Wechselwirkung zwischen Hirnrinde und Thalamus in stark vereinfachter Form nachvollzieht. Mit ihm lässt sich folglich auch ohne viel Aufwand untersuchen, ob und wie die langsamen Kortexwellen die Schwingungen im Thalamus beeinflussen können. Welche Eigenschaften muss das Netzwerk der thalamischen Neuronen haben? Wie reagiert es in Abhängigkeit von der Stärke des Steuersignals? Antworten auf solche Fragen sollten zu einem tieferen Verständnis der neurologischen Vorgänge beim Schlafen und der zu Grunde liegenden physikalischen Mechanismen führen.

Damit die Ergebnisse mit denen experimenteller Untersuchungen vergleichbar waren, fütterten wir das Computermodell bei unseren Simulationen mit realen EEG-Daten für Langsame Wellen im Kortex. Diese dienten als Steuersignal für die Spindeloszillationen im Thalamus. Tatsächlich konnten wir auf diese Weise viele experimentelle Beobachtungen reproduzieren *(Physical Review Letters, Bd. 99, S. 68102)*.

So wanderten auch in unserem Computermodell die Spindeloszillationen zunächst durch den Thalamus. Sobald wir jedoch die Langsamen Wellen aus EEG-Daten einspeisten, hörte diese räumliche Ausbreitung auf. Die Oszillationen erfolgten jetzt überall im Thalamus ortsfest und im gleichen Takt – eine Voraussetzung dafür, dass sie als Spannungsänderungen an der Kopfhaut messbar sind (Bild unten). Außerdem wurden die Spindeln nun zeitlich gruppiert: Es entstand genau die regelmäßige Abfolge aus kurzen Salven und längeren Ruhephasen dazwischen, die während des Tiefschlafs im EEG auftreten.

Als Auslöser für die räumliche und zeitliche Gruppierung der Spindeloszillationen erwies sich im Wesentlichen ein Zurückstellen des Vorgangs in den thalamischen Nervenzellen, der die Ruhephasen verursacht. Verantwortlich für die Pausen zwischen den Oszillationen ist nämlich, wie mehrere experimentelle und theoretische Arbeiten zeigen, ein langsamer Ionenstrom. Während der kurzen Salven verstärkt er sich, bis er die Oszillationen beendet, wodurch auch sein eigenes Anwachsen stoppt. Während er langsam zu seinem Ausgangsniveau zurückkehrt, kann das Neuron nicht oszillieren; es legt eine Zwangspause ein.

**Ohne Steuersignal treten in einem Computermodell des thalamischen Netzwerks Wanderwellen auf (oben links). Nach Eingabe von *slow waves* aus einem Tiefschlaf-EEG als Steuersignal werden diese gleichgetaktet (oben rechts). Während die mittlere Aktivität vorher auf einem einheitlich niedrigen Niveau lag, zeigt sie nun starke Schwankungen (unten).**




JÖRG MAYER, UNIVERSITÄT KIEL

## Therapie von Schlafstörungen

Befindet sich dieser Zyklus nun in allen Nervenzellen in einer unterschiedlichen Phase, ist eine Synchronisation kaum möglich; denn ein oszillierendes Neuron kann eines, das gerade ausruht, nicht aktivieren. Während der negativen Halbwelle der langsamen Kortexschwingungen werden die Oszillationen der gesamten thalamischen Neuronen jedoch unterdrückt. Der Ionenstrom, der die Ruhephasen bewirkt, kehrt dadurch überall auf sein Ausgangsniveau zurück. Dadurch sind nun alle Neuronen im selben Zustand und können sich gegenseitig aktivieren, was schließlich zu synchronen Oszillationen führt. Für diese Gleichtaktung reichte in unserem Model bereits ein sehr schwaches Steuersignal aus dem Kortex.

Die Übereinstimmung mit den experimentellen Befunden ist umso bemerkenswerter, als das verwendete Modell nur die elementarsten Eigenschaften thalamischer Schwingungen berücksichtigt. Diese finden sich in ähnlicher Form in vielen neuronalen Systemen wieder. Deshalb sollte der simulierte Steuerungsmechanismus auch auf andere Bereiche des Hirns übertragbar sein.

Dass unser recht einfaches Computermodell die Realität so gut abbildet, weckt nicht nur Hoffnungen, mit seiner Hilfe weitere Einsichten in die neuronalen Vorgänge im Gehirn zu gewinnen. Es eröffnet auch Chancen für neuartige Therapien von Schlafstörungen. Wenn wir die grundlegenden Vorgänge beim Schlafen im Gehirn genauer kennen, ergeben sich vielleicht bisher ungeahnte Möglichkeiten, den Schlafzustand durch äußere Signale gezielt zu beeinflussen. Computersimulationen sind ein ideales Mittel, sie vorab zu erkunden.

**Jörg Mayer** promoviert als Mitarbeiter des interdisziplinären Sonderforschungsbereichs »Plastizität und Schlaf« der Universität Kiel am dortigen Institut für theoretische Physik und Astrophysik über das Thema dieses Artikels.

## Springers Einwürfe

# Wenn ich Kaiser von China wär'

### Ratschläge für eine künftige Weltmacht

**Als Kind den Erwachsenen** beim Politisieren zuhören zu müssen, machte mich ungeduldig. Ich verstand nicht, wie sie immer bloß so hin und her überlegen konnten, statt endlich einmal beherzt zur Tat zu schreiten. Damals herrschte Kalter Krieg, und ich malte mir aus, wie ich als Großer mit ein paar selbst gebauten und zielgenau programmierten Interkontinentalraketen den Supermächten den sofortigen Weltfrieden und die allgemeine Abrüstung diktieren würde.

An diesen Kinderglauben erinnert es mich heute, wenn Wissenschaftler den Regierungen gute Ratschläge geben, wie die ihre ökologischen Probleme vernünftig lösen sollen. Wahrscheinlich, denke ich, verhallen die wohlgemeinten und entsprechend höflich abgenickten Vorschläge ungehört; denn unweigerlich schiebt sich das politische Tagesgeschäft vor die langfristigen Perspektiven, an die zu denken doch auch noch morgen Zeit bleibt – und »morgen« ist ein dehnbarer Begriff ...

Doch man soll die Hoffnung nie aufgeben. Zum Beispiel China: Das zentralistisch regierte Riesenreich leidet unter ungeheuren Problemen, hat aber auch bewiesen, dass es Umweltbelastungen, für deren Beseitigung die reichen Industrienationen Jahrzehnte brauchten, im Handumdrehen aus der Welt zu schaffen vermag. In Vorbereitung der diesjährigen Olympiade führte das Regime zur Entlastung der städtischen Atemluft innerhalb weniger Jahre Autos mit Katalysator sowie bleifreies Benzin ein. Schon Mitte 2005 wiesen Jared Diamond, amerikanischer Geograf und Bestsellerautor (»Arm und Reich«, »Kollaps«) sowie der Ökologe Jianguo Liu auf solche und weitere Erfolge der chinesischen Umweltpolitik hin. Trotzdem zählten sie zugleich eine erdrückende Vielfalt ungelöster Ökoprobleme auf *(Nature, Bd. 435, S. 1179)*.

**Nun haben dieselben Autoren** erneut eine Bilanz des ökologischen Soll und Habens im Reich der Mitte gezogen und daran die Aufforderung geknüpft, China möge seinen Umweltschutz »revolutionieren«. Solche Ratschläge sind leicht gesagt und schwer zu befolgen *(Science, Bd. 319, S. 37)*.

Vor allem, so empfehlen die Autoren, solle China nicht den Fehler wiederholen, den die reichen Länder im Lauf ihrer Geschichte allesamt begangen haben: zunächst einmal die Umwelt gründlich verschmutzen, dann das lädierte Milieu ein wenig schützen. Tatsächlich hat die chinesische Regierung im März 2004 einen wichtigen Schritt zu einer echt ökologischen Wirtschaftsführung unternommen, indem ein »grünes« Bruttoinlandsprodukt (BIP) entwickelt wurde, das die Kosten der Umweltzerstörung abschätzt und vom herkömmlichen BIP subtrahiert.

Durch Veröffentlichung dieses grünen BIP im November 2005 ging China sogar den meisten Industriestaaten, insbesondere den USA, voran und schuf die Voraussetzung für ein Wirtschaften, das nicht auf schöngerechnetes Wachstum um jeden ökologischen Preis setzt. Doch nun hat die Regierung die Publikation des zweiten Jahresberichts über das grüne BIP gestoppt, vermutlich aus Entsetzen über die Höhe der ökologischen Kosten, die sich darin offenbaren.

Diamond und Liu appellieren deshalb – naiver Kinderglauben? – an die Vernunft der Regierenden: Die würden ihrem Land buchstäblich das Wasser für dauerhaftes Wachstum abgraben, so es ihnen nicht gelänge, Ökonomie und Ökologie organisch zu verbinden. Realistischer erscheint mir die Hoffnung der Autoren auf den Druck einer teils staatlich geduldeten, teils kaum unterdrückbaren Öffentlichkeit, die sich in letzter Zeit vor allem im Internet und per SMS über Mobiltelefone artikuliert. Solch elektronischer Massenprotest hat beispielsweise den Bau einer Chemieanlage im Zentrum der Millionenstadt Xiamen verhindert.

Michael Springer


## wichtige **online** **adressen**

**Brainlogs**
Blogs für die Welt im Kopf
**www.brainlogs.de**

**Hadronics**
Neue Lösungen für das Massenproblem der Teilchenphysik
**www.hadronics.de**

**Kernmechanik – von Kernspin bis Kosmologie, von Dunkler Materie und Energie**
**www.kernmechanik.de**

**KOSMOpod**
Astronomie zum Hören
**www.kosmopod.de**

**Portraits, Interieurs, Landschaften, Figurativa u. a.**
Dipl.-Des. Ewa Kwasniewska
– Kunstmalerin –
**www.kwasniewska.com**

**Platinnetz**
das Netzwerk für die Generation der Jungebliebenen
**www.platinnetz.de**

**WISSENSlogs**
Science unplugged
**www.wissenslogs.de**

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

# Die Renaissance der flüssigen Teleskopspiegel

Ein Visionär griff eine alte Idee auf und realisierte sie mit moderner Technologie. Mittlerweile nehmen es die ungewöhnlichen Teleskope von Paul Hickson mit den besten Instrumenten der Welt auf – und kosten gerade mal ein Zehntel.

## In Kürze

- **Flüssiges Quecksilber** in einer gleichmäßig rotierenden Schale bildet eine paraboloide Oberfläche aus, die Sternlicht sammeln und fokussieren kann. So lassen sich »Flüssigspiegelteleskope« (LMTs) bauen, die viel preisgünstiger sind als vergleichbare Exemplare mit Glasspiegeln.
- LMTs lassen sich den Sternbewegungen nicht nachführen. Ihren Erfolg ermöglichte erst **moderne CCD-Technologie**.
- Heutige LMTs erreichen die Qualität der besten konventionellen Teleskope. Ein 4- und ein 8-Meter-Exemplar werden derzeit geplant. Eine Nasa-Projektgruppe konzipiert sogar ein **100-Meter-LMT auf dem Mond**.

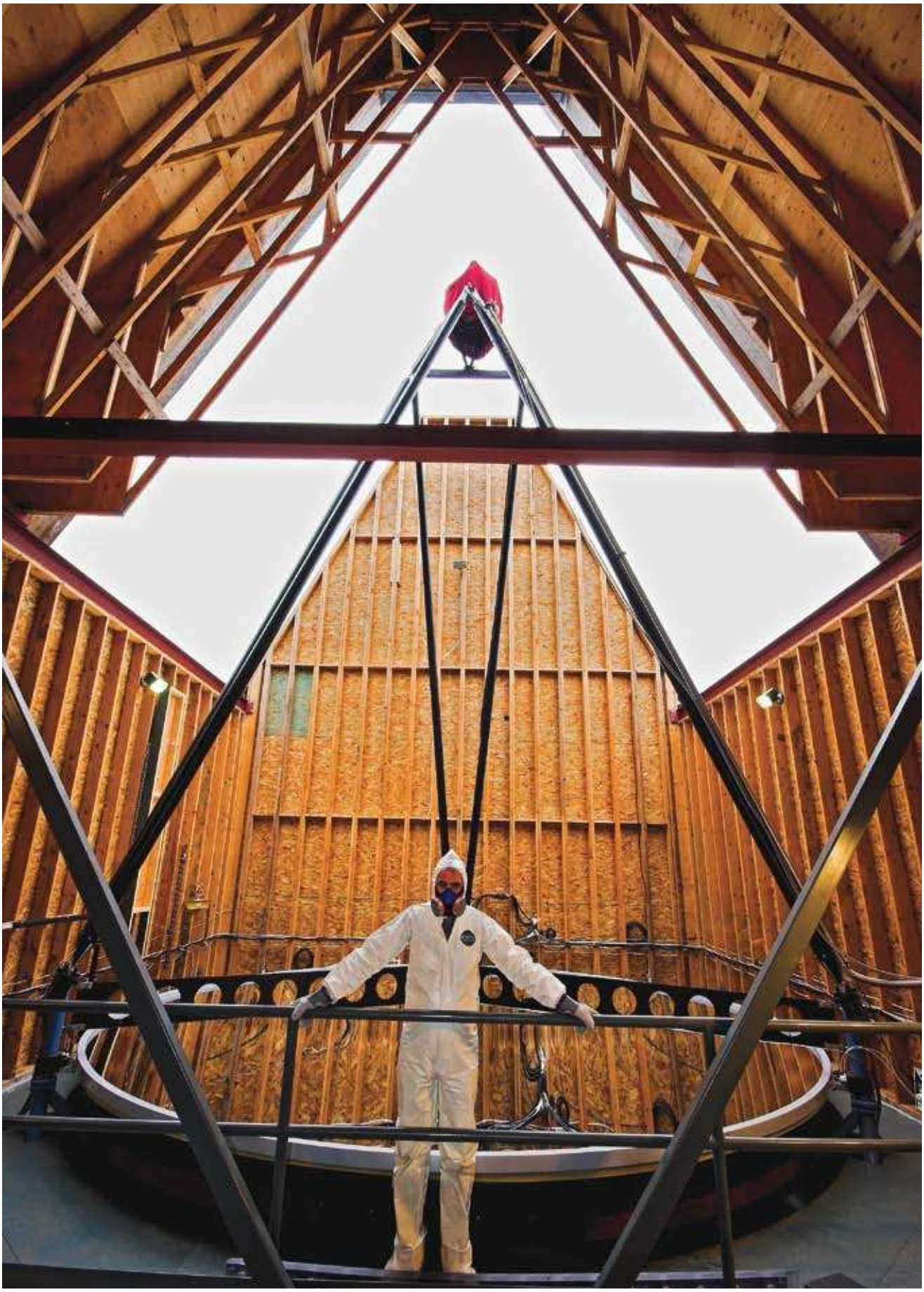
Von Paul Hickson

Das Häuschen, das sich an die Berge im Südwesten der kanadischen Provinz British Columbia schmiegt, könnte man für eine schlichte Skihütte oder wegen seines steilen Dachs vielleicht auch für eine kleine Kirche halten. Doch in seinem Inneren verbirgt es eines der größten optischen Teleskope Nordamerikas. In klaren Nächten fährt das Dach zur Seite und gibt die Sicht frei auf darüber hinwegziehende Sterne und Galaxien. Wirklich beeindruckend aber ist das Herzstück dieses Instruments: Sein Hauptspiegel, der das Licht sammelt und fokussiert, ist eine rotierende Schale, gefüllt mit flüssigem Quecksilber.

Das ist ungewöhnlich, denn normalerweise setzen Teleskopbauer auf Spiegel aus Glas. Die derzeit größten Glasspiegel sind in den beiden 10-Meter-Keck-Teleskopen auf dem Mauna Kea auf Hawaii und im Gran Telescopia Canarias (GTC) auf La Palma zu finden. Der Spiegel des GTC hat sogar einen Durchmesser von 10,4 Metern. Aufgebaut sind diese tonnenschweren Exemplare aus jeweils 36 sechseckigen Segmenten. Jedes einzelne davon ist sorgfältig geschliffen und auf ein paar Dutzend Nanometer genau poliert worden, bevor eine dünne, spiegelnde Schicht aus Aluminium oder Silber aufgedampft wurde. Aufwändige Zusatzsysteme sorgen dafür, dass weder schwankende Temperaturen noch das Eigengewicht der Spiegel zu Formveränderungen führen. Moderne Großteleskope sind zudem mit Systemen aus Sensoren und mechanischen Aktuatoren ausgestattet, die Störungen durch Luftbewegungen in der Atmosphäre ausgleichen. Solche technologischen Wunderwerke sind natürlich teuer. Ein 6-Meter-Exemplar zum Beispiel kostet ein- oder gar zweistellige Millionenbeträge.

Teleskope mit flüssigen Spiegeln (*liquid-mirror telescopes*, LMTs) sind viel billiger und machen ebenso gute astronomische Bilder. Ihr Prinzip versteht jeder Physikstudent im ersten Semester. An der Oberfläche einer Flüssigkeit im Gleichgewicht ist die Lageenergie überall gleich, denn jedes Molekül der Oberfläche befindet sich im Gravitationsfeld der Erde auf selber Höhe. Wäre dem nicht so, gäbe es Energiedifferenzen, die wiederum Kräfte wirken

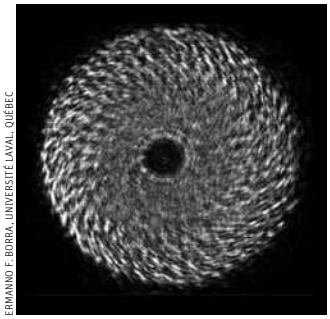
**Mit Overall und Atemmaske: Paul Hickson vor dem Large Zenith Telescope (LZT), dessen 6-Meter-Spiegel aus Quecksilber besteht. Rund sieben Umdrehungen pro Minute sorgen dafür, dass die Oberfläche der Flüssigkeit die Gestalt eines Paraboloids annimmt. So kann sie Sternlicht sammeln und in Richtung eines Detektors bündeln.**



ACTION IMAGES, MICHAEL DESJARDINS

ACTION IMAGES, MICHAEL DESJARDINS

**Eines der größten Teleskope Nordamerikas beherbergt dieses 395 Meter hoch gelegene Observatorium: das LZT. Astronomische Idealbedingungen herrschen hier allerdings nicht: Der Malcolm Knapp Research Forest gehört zur Universität von British Columbia, an der LZT-Entwickler Paul Hickson lehrt.**



ERMANNO F. BORRA, UNIVERSITÉ LAVAL, QUÉBEC

**Sturm über dem Spiegel: Die schnelle Rotation sorgt vor allem in dessen äußeren Regionen dafür, dass die darüberströmende turbulente Luft Wellen auf der Quecksilberoberfläche erzeugt. Dieses Bild eines 2,5-Meter-Flüssigspiegels wurde mit einer speziellen optischen Technik aufgenommen.**

ließen – diese würden die Flüssigkeit genau so lange zum Fließen bringen, bis die Lageenergie überall denselben Wert hat. Fast jede Flüssigkeit weist aus diesem Grund eine flache Oberfläche auf.

Lassen wir aber eine Flüssigkeit mit konstanter Winkelgeschwindigkeit um eine senkrechte Achse rotieren, ändert sich die Situation. Auf jedes Molekül wirkt jetzt nicht nur die nach unten gerichtete Schwerkraft, sondern auch die Fliehkraft, die in horizontaler Richtung an ihm zerrt. Das Ergebnis der Kräftekombination, die man auch in einem rotierenden Wasserglas beobachten kann: Die Oberfläche der Flüssigkeit nimmt im energetischen Gleichgewicht die Form eines Paraboloids an. Das ist genau das, was man – auch im Fall der meisten konventionellen Teleskope – zum Bündeln von Licht benötigt.

Lichtstrahlen, die parallel zur Achse einfallen, reflektiert ein paraboloider Spiegel so, dass sie genau in einem Punkt zusammentreffen: dem Brennpunkt des Spiegels. Parallele Strahlen, die aus anderen Richtungen kommen, werden allerdings nicht so perfekt fokussiert. Daher werden drei oder vier zusätzliche Linsen nahe dem Brennpunkt benötigt, damit die Bildqualität auch über ein ausgedehnteres Bildfeld hinweg hoch bleibt.

Neu ist die Idee des Flüssigspiegelteleskops nicht. Ihre erste schriftliche Erwähnung im Jahr 1850 stammt von Ernesto Capocci, Astronom vom Osservatorio Astronomico de Capodimonte in Neapel. Den ersten Schritt in die Praxis ging aber erst Henry Skey vom neuseeländischen Dunedin Observatory: 1872 erzeugte er in seinem Labor einen Flüssigspiegel mit einem Durchmesser von 35 Zentimetern. Bis 1909 dauerte es dann noch, bis ein komplettes LMT entstand. Sein Erbauer war Robert Wood, der anschließend zahlreiche weitere LMTs konstruierte.

Das erfolgreichste Modell des US-Physikers von der Johns-Hopkins-Universität in Maryland war ein Spiegel mit 51 Zentimeter Durchmesser. Die flache Schüssel mit der Flüssigkeit ließ Wood auf einem mechanischen Lager rotieren. Für den Antrieb sorgte ein kleiner Motor, der durch einen Treibriemen aus Fasern indischen Gummis mit der Schale verbunden war. Als er den Flüssigspiegel zu einem vollständigen Teleskop ausgebaut hatte, konnte Wood damit sogar das Vierfachsternsystem Epsilon Lyrae auflösen.

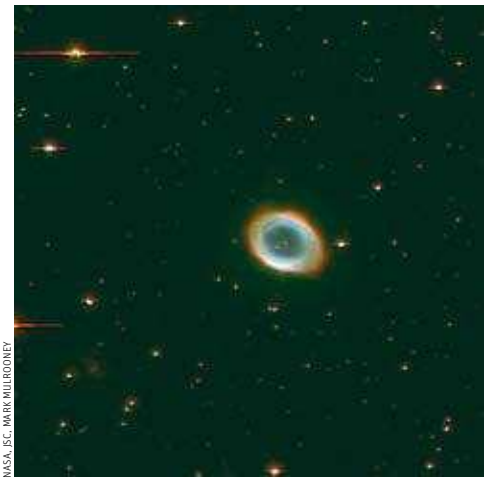
Das war keine geringe Leistung: Zwei der Epsilon-Lyrae-Sterne haben einen Abstand von nur 2,3 Bogensekunden. Damit war der Spiegel um gerade einmal den Faktor zehn von der theoretischen Beugungsgrenze entfernt, die einem Spiegel dieser Größe gesetzt ist. Für den praktischen Einsatz war Woods Teleskop allerdings nicht optimal. Vibrationen und ein deutliches »Eiern« des Spiegels bereiteten Schwierigkeiten. Vor allem aber änderte sich ständig die Brennweite, weil er die Rotationsgeschwindigkeit nicht präzise genug kontrollieren konnte.

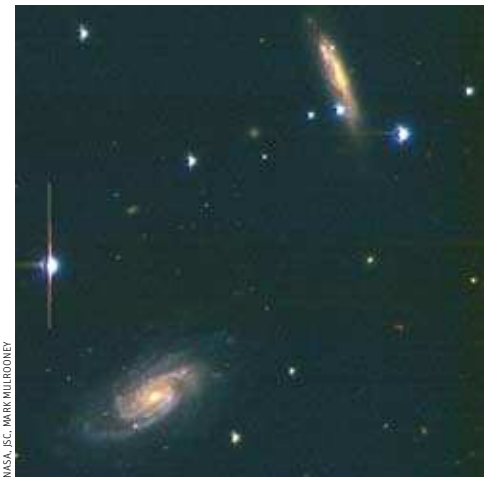
Und auch ein ganz grundsätzliches Problem stand dem Erfolg seiner Arbeit im Weg. Weil die Rotationsachse bei jedem LMT senkrecht stehen muss, damit die paraboloide Form des Spiegels zu Stande kommt, kann es immer nur senkrecht in die Höhe blicken. Daher können Teleskope dieser Bauweise nicht einmal den Bewegungen der Sterne nachgeführt werden. Bei längeren Belichtungszeiten hinterlassen die punktförmigen Sterne regelrechte Bahnen auf den Fotoplatten: Das Bild driftet.

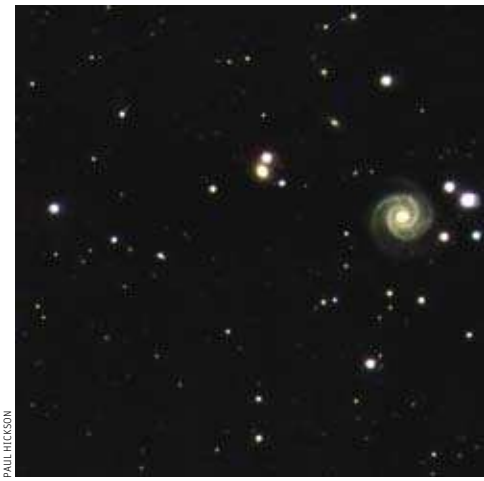
## Sterne landen in Potenzialtöpfen

Ihren Reiz für die Astronomie büßten die LMTs angesichts der Vielzahl der Probleme damals fürs Erste ein und verschwanden für über 70 Jahre aus dem Blickfeld. Die digitale Technik holte sie im Jahr 1982 allerdings wieder in den Fokus. Das Problem der Bilddrift nämlich schien dem kanadischen Physiker Ermanno Borra von der Laval-Universität in Quebec und seinen Kollegen mittlerweile durchaus lösbar. Man müsste nur den chemischen Film gegen einen CCD-Chip austauschen.

Solche Charge-Coupled Devices, wie sie auch in den meisten Digitalkameras ihren Dienst tun, sind integrierte Schaltkreise aus


NASA, JSC, MARK MULROONEY


NASA, JSC, MARK MULROONEY


PAUL HICKSON

**LMT-Aufnahmen von Ring, Pärchen und Spirale: Die Abbildung des Ringnebels in der Leier (links) ist dem Nasa Orbital Debris Observatory (Nodo) gelungen, dessen Teleskop von Paul Hickson stammt. Eine weitere Nodo-Aufnahme zeigt das Galaxienpaar NGC 3423 und NGC 3430 im Kleinen Bären (Mitte; die roten Linien sind Artefakte des CCD-Detektors). Die namenlose Spiralgalaxie (rechts) fing das LZT ein.**

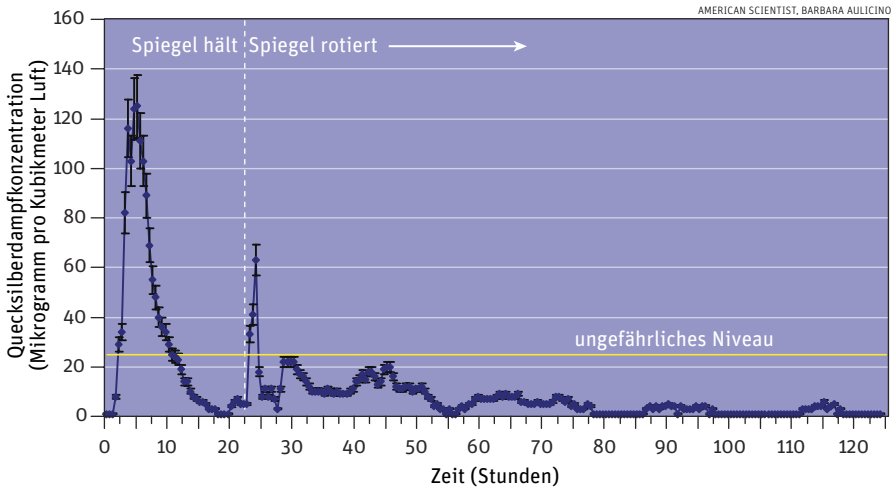
Silizium, die wie ein Schieberegister funktionieren. Die Elektronen darin werden von auftreffenden Lichtteilchen auf eine höhere Energie (in das so genannte Leitungsband) gehoben. Die Zahl der angeregten Elektronen ist dabei proportional zur Zahl der eingefallenen Lichtteilchen. Gespeichert werden sie dann in so genannten Potenzialtöpfen, gewissermaßen den Pixeln des entstehenden Bildes. Möglich macht das eine Reihe von Elektroden, an die man geeignete Spannungen anlegt: Sie sorgen dafür, dass die angeregten Elektronen an Ort und Stelle festgehalten werden.

Nach dem Ende der Belichtung muss die elektronische Information dann nur noch aus dem Chip ausgelesen werden. Dazu lassen sich die Spannungen so variieren, dass die in den Potenzialtöpfen gespeicherten Elektronen von Topf zu Topf bis zum Rand des Chips weitergereicht werden. Dort schließlich wird jeder Potenzialtopf »geleert«: Abhängig von der Zahl der darin gespeicherten Elektronen entsteht eine Spannung, die wiederum digitalisiert werden kann. So lässt sich das elektronische Bild Potenzialtopf für Potenzialtopf, Pixel für Pixel auslesen.

Um bewegte Bilder aufzunehmen, muss man die Spannungen jetzt noch so manipulieren, dass die Elektronen bereits während der Belichtung topfweise weitergereicht werden. Das elektronische Bild wandert also schon im Verlauf der Belichtung. Geschieht das mit derselben Geschwindigkeit, mit der auch das vom Teleskopspiegel erzeugte Bild des Himmels über den Chip wandert, halten die Pixel mit der Sternbewegung Schritt und es entsteht ein scharfes Bild.

## Abbildungsqualität am Limit des naturgesetzlich Machbaren

Ein Verschluss ist bei dieser Technik nicht mehr nötig. Sobald das Abbild eines Sterns den Rand des CCD erreicht hat, werden einfach die zugehörigen Elektronen ausgelesen. Die effektive Belichtungszeit ist dann die Dauer, die das Bild eines Sterns für die komplette Drift über den Chip benötigt, meist ein bis zwei Minuten. Auch bei konventionellen astronomischen Teleskopen wird dieses »drift scanning«-Verfahren oft dann angewandt, wenn große Himmelsfelder abgebildet werden sollen.




**Wird der Spiegel zu Reinigungszwecken gestoppt, steigt die Quecksilberkonzentration in der Luft (Werte links der senkrechten Linie). Sobald er wieder rotiert (rechts), bildet sich an der Oberfläche eine dünne Oxidschicht aus. So bleibt die Konzentration unter der Grenze, deren Einhaltung das US-Arbeitsministerium fordert (gelbe Linie). In Deutschland liegt die »maximale Arbeitsplatzkonzentration« bei 100 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft.**

Für ein LMT setzte es Borra letztlich zwar doch nicht ein, dafür aber gehen weitere Innovationen auf sein Konto. In weniger als einem Jahrzehnt baute er mit seinen Kollegen Quecksilberspiegel bis 1,5 Meter Durchmesser; später folgte ein Exemplar mit 3,7 Metern. Vibrationen verhinderte er ebenso wie das »Eiern«, indem er das mechanische durch ein praktisch reibungsfreies Lager aus Druckluft ersetzte. Mittels eines Synchronmotors, der von regelmäßigen Kristallschwingungen kontrolliert wurde, erzielte Borra zudem eine gleichmäßige Rotationsgeschwindigkeit.

Im Labor erhielt sein Team Bilder, die bis an das Limit des naturgesetzlich Machbaren gingen, nämlich an die schon genannte Beugungsgrenze. (Sie beschreibt die Tatsache, dass zwei Objekte, deren Abstand weniger als die halbe Wellenlänge des von ihnen ausgehenden Lichts beträgt, nicht als getrennt wahrnehmbare Bildpunkte abgebildet werden können.) Und schließlich begann Borra, einige seiner Spiegel in Verbindung mit einer 35-Millimeter-Filmkamera auch für astronomische Beobachtungen zu nutzen.

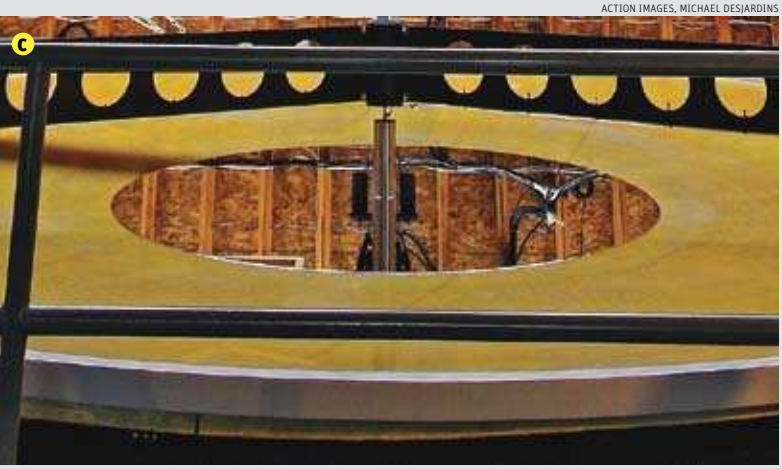
## Konkurrenz zu den größten konventionellen Teleskopen

Das interessierte mich, und so machten auch wir uns an die Arbeit. Nach beträchtlichen Anstrengungen stellten meine Kollegen und ich im Jahr 1994 das erste wirklich praktikable und mit dem Drift-scanning-Verfahren ausgestattete LMT vor. Ein Quecksilberspiegel mit 2,7 Meter Durchmesser, eine Linse mit vier Elementen für die Korrektur der achsfernen Aberrationen und eine CCD-Kamera bildeten seine Grundbestandteile. Mit diesem

## Das Innenleben des Large Zenith Telescope

BEIDE: PAUL HICKSON

ACTION IMAGES, MICHAEL DESJARDINS




**Der Startschuss fiel 1995**. Damals begann der Bau der Sternwarte, die das LZT beherbergen sollte. Errichtet wurde sie auf Grundgestein, um Vibrationen des Bodens zu minimieren. Allein der Betonfußboden des Gebäudes ist einen ganzen Meter dick. Die Basis der Wände besteht ebenfalls aus Beton. Wie der Boden auch ist dieser Bereich versiegelt, um austretendes Quecksilber zurückhalten zu können.

Der 3 Tonnen schwere Spiegel des Teleskops wird von einem dünnen Luftkissen getragen, das von einem eigens gefertigten Luftlager erzeugt wird (Bild a und d). Ein Kompressor sorgt für ständigen Nachschub von Luft. Damit er keine Erschütterungen des Spiegels verursacht, ist er 20 Meter entfernt in einem Raum untergebracht. Ein bürstenloser Elektromotor und ein optischer Impulsgeber, der 2500 Signale pro Umdrehung aussendet, sind in das Lager eingebaut. So lässt sich die Geschwindigkeit der Rotation mit einer Genauigkeit von eins zu einer Million kontrollieren.

Teleskop gelangen uns Digitalaufnahmen von Sternen und Galaxien, deren Auflösung nur noch durch das Seeing – das Wort aus dem Astronomenslang bezeichnet Turbulenzen in der Atmosphäre –, nicht aber durch Unzulänglichkeiten des Quecksilberspiegels begrenzt waren. Drei weitere Instrumente folgten. Zwei davon wurden für Studien der Erdatmosphäre mittels Lasern eingesetzt, das dritte war als Nasa Orbital Debris Observatory bis 2002 in New Mexico in Betrieb und fahndete mit seinem 3-Meter-Spiegel nach Weltraummüll.

Im Jahr 2005 wagten wir uns schließlich an einen 6-Meter-Spiegel. Beim Bau des Large Zenith Telescope (LZT), wie wir das Projekt nannten, half mir auch, dass ich mich in meiner Freizeit mit der Konstruktion von Experimentalflugzeugen beschäftigt hatte. Unser Ziel war die Entwicklung und Perfektionierung der Flüssigspiegeltechnologie, sodass sie mit den größten konventionellen Teleskopen würde konkurrieren können.

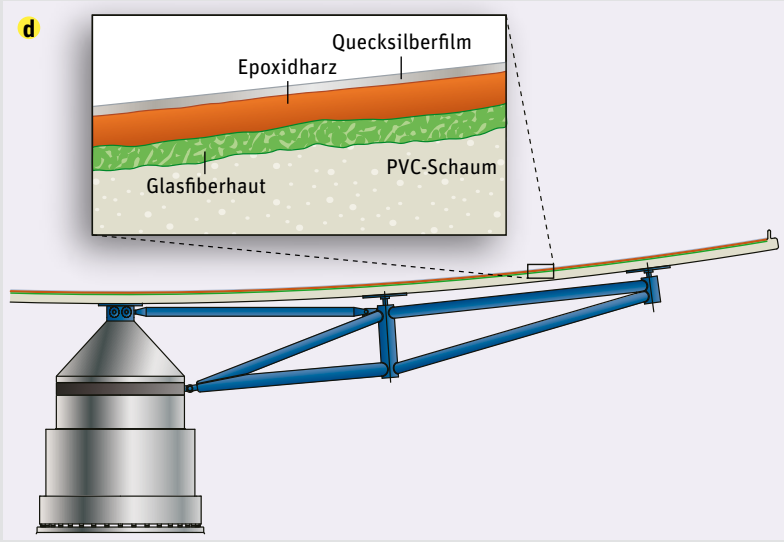
Zwar schauen LMTs nur senkrecht nach oben, während »normalen« Teleskopen weiterhin der ganze Himmel offensteht. Aber für viele wissenschaftliche Studien ist das gar nicht nötig. Bei statistischen Untersuchungen an einer großen Zahl von Himmelskörpern kommt es oft nicht darauf an, wohin man blickt. Ferne Galaxien zum Beispiel finden sich in Richtung des Zenits genauso wie in jeder anderen Richtung. Obendrein bieten sich hier beste Sichtbedingungen: In Richtung des Zenits ist die Dicke der Luftschicht zwischen Teleskop und Weltraum am geringsten, sodass atmosphärische Absorption, Streuung und Bildverzerrung den kleinsten Einfluss ausüben. Hinzu

*»Mir half beim Bau des **6-Meter-Spiegels,** dass ich mich mit der Konstruktion von Experimentalflugzeugen beschäftigt hatte«*

Das Luftlager ist fest mit Stahltrossen verbunden (d). Diese wiederum tragen eine große Schale aus leichtgewichtigem Schaum (b), die für die Aufnahme des Quecksilbers bestimmt ist. Zwischen Trossen und Schale sorgen Scharniere dafür, dass die unterschiedlichen Volumenveränderungen der Materialien bei Erwärmungen ausgeglichen werden. Eingeschlossen ist der Schaum zwischen Schichten aus faserverstärktem Kunststoff (d). Zuvor waren die sieben Sechsecke und sechs Dreiecke (b), aus denen die Schaumschale besteht, unter Hitzeeinwirkung leicht gekrümmt worden, sodass die Schale bereits ungefähr die gewünschte parabolische Gestalt annahm.

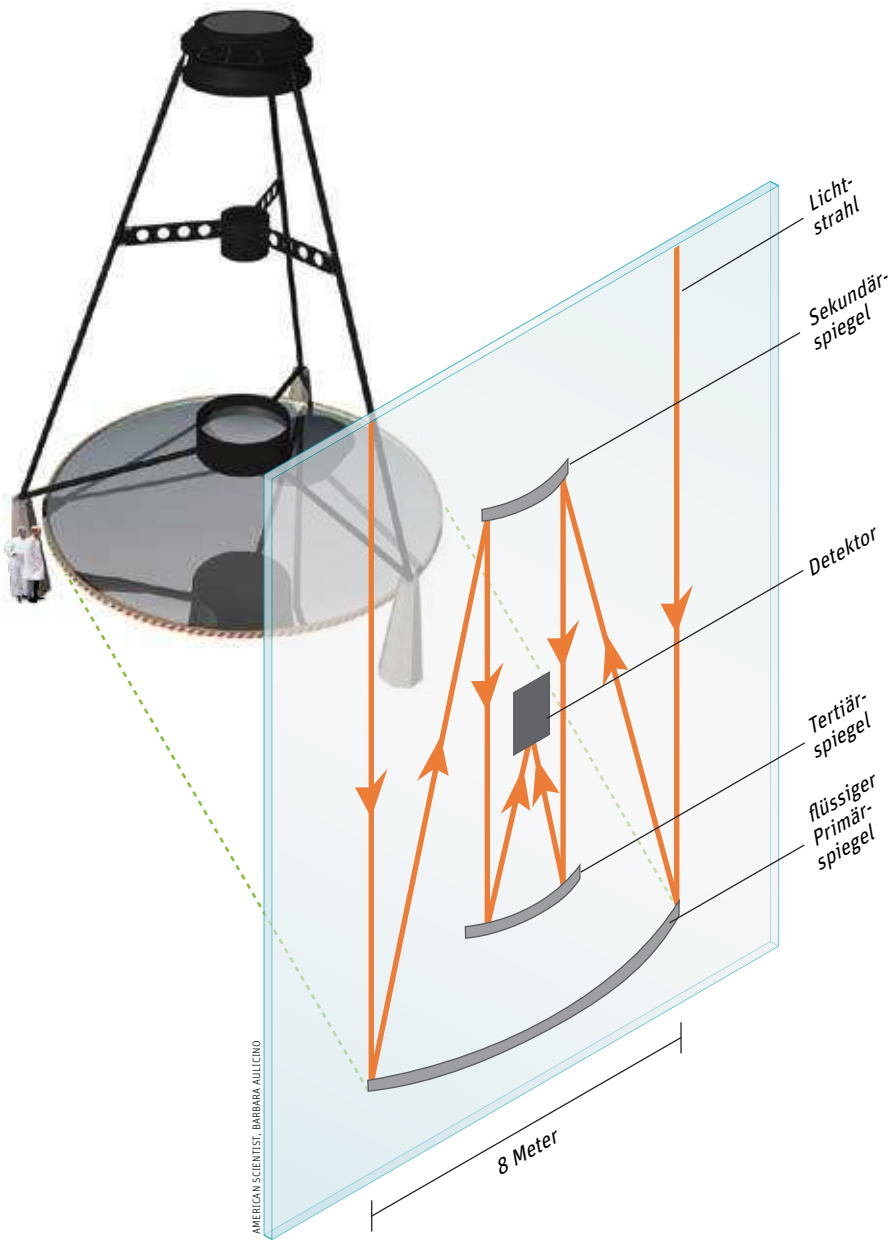
Dennoch wurde zusätzlich noch eine Schicht flüssiges Epoxidharz aufgebracht (d). Das geschah, während die Schale bereits rotierte: So erstarrte das Harz auf eine Weise, dass deren endgültige Gestalt noch näher an die paraboloide Idealform heranreichte. Etwa 40 Liter Quecksilber, die über das Harz geschüttet werden (c), bedecken die Schale schließlich mit einer etwa 1,5 Millimeter dicken, reflektierenden Oberfläche.

**Eine dünne Mylarfolie** – dieser Kunststoff ist bei höchstmöglicher Festigkeit sehr leicht – deckt den Spiegel ab und rotiert mit ihm. Befestigt ist die Folie an einer Trägerstruktur aus keilförmigen Segmenten (e). Zwar fällt dadurch weniger Licht auf den Spiegel, andererseits aber wird auf diese Weise die Bildung von Luftwirbeln über dem Quecksilber verhindert. Sie würden zu Wellen auf dessen Oberfläche führen und sein Reflexionsverhalten beeinträchtigen.




AMERICAN SCIENTIST, BARBARA AULICINO

PAUL HICKSON




**Ein »Alpaca« für Chile. Das »Advanced Liquid-mirror Probe for Astrophysics, Cosmology and Asteroids«, hier eine Skizze, ist als 8-Meter-LMT geplant. Es soll mit kleineren Sekundär- und Tertiärspiegeln aus Glas und bis zu 240 Detektor-CCDs ausgestattet werden. Standort wird der chilenische Berg Cerro Tololo sein.**

kommt, dass unser LZT weniger als eine Million US-Dollar kostete und damit um den Faktor zehn billiger als ein konventionelles Teleskop vergleichbarer Größe ist.

Sein Erfolg kam indessen nicht von heute auf morgen. Wir hatten unzählige und meist unerwartete Hürden zu bewältigen. Schon früh in der Planungsphase entdeckten wir, dass kein Luftlager existierte, das einen drei Tonnen schweren 6-Meter-Spiegel tragen könnte. Wir mussten extra ein solches anfertigen lassen, was kein leichtes Unterfangen war; erst eine Firma in Minneapolis schaffte es schließlich. Auch zur Überhitzung und zum Einfrieren des pneumatischen Systems für das Luftlager kam es bisweilen. Eines Tages sprang sogar eine Maus auf den rotierenden Spiegel und lief daraufhin verängstigt im Kreis, während unter ihr der Quecksilberfilm brach.

Zwei unserer vielen Probleme machten uns allerdings ernsthaft zu schaffen. Unseren Spiegel treibt ein Motor an, der von einem hochstabilen Oszillator synchronisiert wird. Dennoch gibt es keine starre Verbindung zwischen Motor und Spiegel, denn das würde zu Schwingungen führen. Stattdessen sitzt auf dem Rotor des Luftlagers ein Ring aus Permanentmagneten. Diese Magnete drehen sich innerhalb eines rotierenden Magnetfelds, das von drei stationären Spulen erzeugt wird und den Spiegel in Drehung versetzt.

Eigentlich ein viel versprechendes Verfahren, dachten wir: Die Trägheit unseres schweren Spiegels würde schon dafür sorgen, dass die Rotationsgeschwindigkeit konstant bliebe. Doch weit gefehlt! Als wir das Teleskop zum ersten Mal in Betrieb nahmen und kurz darauf Windböen durch das offene Dach des Observatoriums wehten, wich die Geschwindigkeit um bis zu 0,1 Prozent vom Sollwert ab. Angestrebt hatten wir aber eine Präzision von eins zu einer Million.

## Lichthalo ruinierte die Bilder

Die Kontrolle der Rotationsgeschwindigkeit musste also um den Faktor 1000 besser werden. Wir entwickelten daher ein System, das die Drehung aktiv stabilisierte. Dazu brachten wir am Spiegel ein Gerät an, das in jeweils exakt gleichen zeitlichen Abständen 2500 optische Impulse pro 360-Grad-Drehung aussendet. Ein Kontrollsystem misst die Ankunftszeit jedes Impulses und vergleicht sie mit der erwarteten Zeit für einen perfekt rotierenden Spiegel. Kommt ein Impuls zu spät, fließt mehr Strom in die Magnetspulen und der Spiegel wird beschleunigt – und umgekehrt. Das funktionierte: Unter fast allen Beobachtungsbedingungen können wir die Rotationsgeschwindigkeit jetzt mit der gewünschten Genauigkeit konstant halten.

Auf ein zweites, fast schon unheimliches Problem stießen wir, als wir mit den Aufnahmen begannen. Ein diffuser Lichthalo um jeden Stern ruinierte unsere Bilder! Dieses Phänomen hatten wir zwar schon im Labor gesehen, aber nie in solchem Ausmaß. Grund dafür waren offenbar die zahlreichen Wellen, die über die Oberfläche des Quecksilbers liefen und dessen Reflexionsverhalten variieren ließ. Ihre Ursache erklärten wir uns so: Der Flüssigspiegel des LZT ist groß und rotiert ziemlich schnell, dabei bewegt sich der Rand des Spiegels mit 2,2 Metern pro Sekunde durch die Luft. Das entspricht einem Wind, der über das Quecksilber streicht und dabei die Wellen erzeugt.

Zunächst testeten wir unsere Vermutung mit Lametta, das wir an der Spitze eines Stabs befestigt hatten. Tatsächlich: Nahe der Spiegelmitte war die Luftströmung oberhalb des Spiegels ruhig, ab etwa einem Meter Abstand wurde sie jedoch turbulent. In einem Abstand von weniger als einem Zentimeter über dem Quecksilber entstanden spiralförmige Wirbel und erzeugten die störenden Wellen. Optische Tests bestätigten dieses Ergebnis.

Schließlich fanden wir eine Lösung: Ein paar Zentimeter über dem Spiegel befestigten wir eine dünne Folie aus durchsichtigem Mylar-Kunststoff, die mit dem Spiegel rotiert. Dadurch wird auch die Luftschicht über dem Quecksilber zur Rotation gezwungen – relativ zum Spiegel ist sie nun in Ruhe. Die Luftwirbel gibt es zwar immer noch, nun aber entstehen sie über der Folie.

Seither erreicht das Large Zenith Telescope das angestrebte Ziel: eine Bildqualität, die mit der der besten konventionellen Teleskope vergleichbar ist. Den LMTs hat dies eine viel versprechende Zukunft eröffnet. Zwei neue Projekte sind derzeit in Planung. Unter Leitung von Jean Surdej von der Universität Liège in Belgien soll das 4-meter International Liquid Mirror Telescope entstehen. Geplant ist, es mit einer großformatigen CCD-Kamera auszustatten und an einem für astronomische Zwecke perfekten Standort in den chilenischen Bergen zu installieren. (Das LZT hatten wir notgedrungen nahe meiner Universität in Vancouver gebaut).

Das zweite Team unter Leitung von Arlin Crotts von der New Yorker Columbia-Universität plant, ebenfalls in Chile, das 8-Meter-LMT Alpaca. Das »Advanced Liquid-mirror Probe for Astrophysics, Cosmology and Asteroids« soll ein Gesichtsfeld von drei Grad abdecken. Für seine Drift-scan-Kamera sind bis

## RIESENSPIEGEL

- Paul Hickson, der Autor dieses Beitrags, steht auch dem Beratungsgremium für das **Thirty Meter Telescope** vor. Die Spiegelfläche des mindestens 750 Millionen US-Dollar teuren Instruments übertrifft diejenige derzeitiger Rekordteleskope (rund 10 Meter) um das Neunfache.
- Gebaut wird ab 2009. 2016 soll das TMT auf Hawaii in Betrieb gehen. Der konventionelle Spiegel wird **aus 492 Segmenten** bestehen.
- Das TMT ist eines der zurzeit wohl **ambitioniertesten astronomischen Vorhaben**. Projektleiter ist der Deutsche Rolf-Peter Kudritzki, Direktor des Instituts für Astronomie an der Universität Hawaii.
- Das TMT deckt den Spektralbereich von **Ultraviolett bis Infrarot** ab. Seine Fähigkeiten werden sich mit denen des James Webb Space Telescope (Start 2013) ergänzen.

**Das Gran Telescopio Canarias auf La Palma, das im Juli sein *first light* sah, ist mit 10,4 Meter Spiegelfläche das derzeit größte konventionelle Teleskop. Es kostete über 100 Millionen Euro. LMTs sind viel billiger.**

ÁNGEL L. ALDAI / IAC, GTC




# Zu den Ursprüngen des Universums

› Von der Gegenwart zurück zum Urknall: Die einzige zusammenhängende Geschichte des Universums, grandios illustriert

› Mit erstmals veröffentlichten Fotos und faszinierenden Computer-Animationen

Was geschah beim Urknall, dem Anbeginn von Raum und Zeit? Gab es »Etwas« davor? Ist das Universum unendlich oder hat es einen Rand? In ausgesprochen gut verständlichen Texten erklären Igor und Grichka Bogdanov, wie das Universum entstand, wie es heute aussieht und wie es sich in Zukunft verändern wird.

Von Igor und Grichka Bogdanov.
Mit einem Vorwort von Joachim Bublath.
200 Seiten mit 191 farbigen Fotos, Satellitenbildern und 3D-Computeranimationen.
Gebunden mit Schutzumschlag. Großformat.

**Jetzt zum Einführungspreis € 34,90 bis 31.12.2008** (danach € 39,90).

**Mehr Infos zum Buch im Internet: www.theiss.de**

Konrad Theiss Verlag GmbH
Stuttgart
Tel. 07 11/2 55 27-14, Fax -17
E-Mail: service@theiss.de

THEISS

## MONDTRÄUME

- Die Vorschläge zur **Nutzung des Monds**, die die Nasa 2006 weltweit sammelte und zu rund 200 Projektideen verdichtete, umfassen auch Teleskope.
- Besonders wünschenswert sind **Radioteleskope** auf der erdabgewandten Seite, wo sie **von irdischer Radiostrahlung abgeschirmt** wären. Ideal für Infrarotteleskope sind tiefe Krater, in die die Sonne nicht scheint. Dies vermindert störende Wärmestrahlung.
- Anders als Weltraumteleskope sind Instrumente auf dem Mond aber Staub, mechanischen Belastungen durch Gravitation und **seismischen Erschütterungen** ausgesetzt.

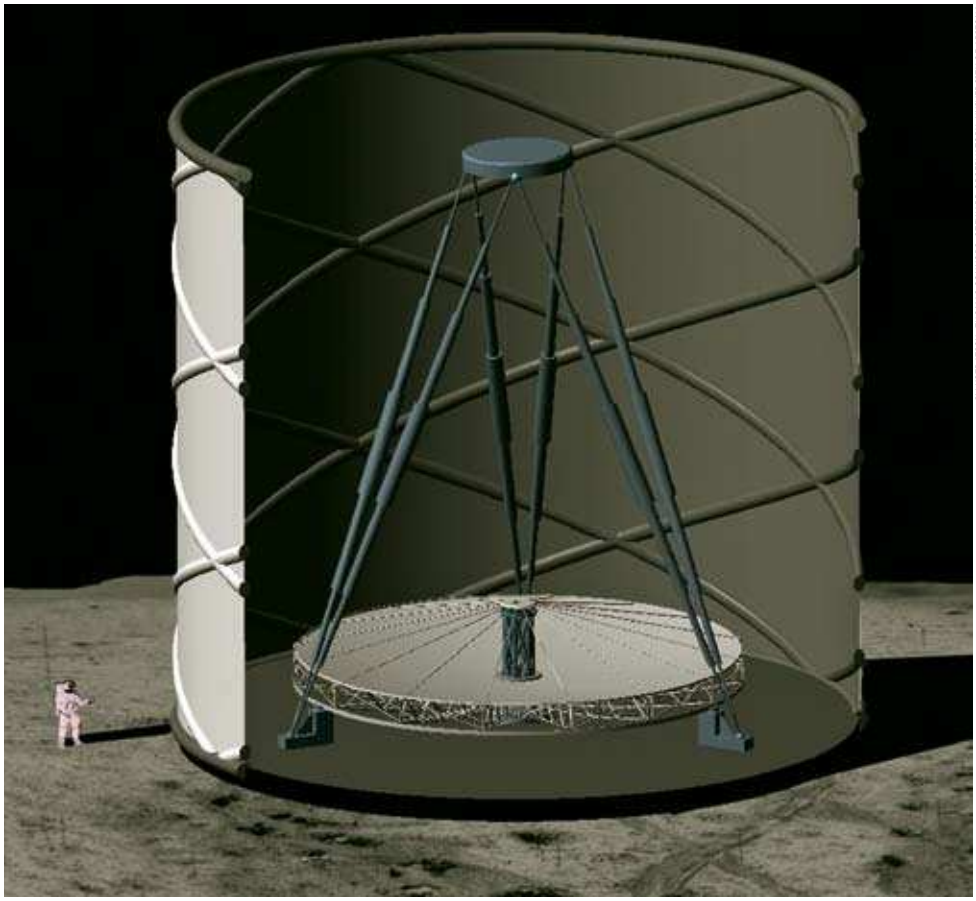


ILLUSTRATION: THOMAS CONNORS, STEWARD OBSERVATORY, UNIVERSITY OF ARIZONA

**Die Zukunft ist schon in Planung: Ein 100-Meter-LMT auf dem Mond (Illustration) könnte monatelang denselben Fleck am Himmel beobachten und unter besten astronomischen Bedingungen selbst schwächste Objekte ausmachen.**

zu 240 CCD-Chips geplant. Klappt es mit der Finanzierung, könnten diese beiden Instrumente schon in drei bis vier Jahren in Betrieb gehen.

Geradezu faszinierende Perspektiven für künftige LMTs würden sich eröffnen, wenn man auch aktive Korrekturelemente im Brennpunkt verwendete. Dann könnten sie Himmelsobjekte bis zu 30 Minuten lang verfolgen. Selbst Infrarotkameras, für die es keine geeigneten Drift-scan-CCDs gibt, würden dann zum Einsatz kommen. Noch weiter fortgeschrittene LMTs könnten mittels adaptiver Optik auch die Luftunruhe kompensieren. Und wenn man das Licht mehrerer LMTs zusammenführen würde, wie das auch schon bei konventionellen Teleskopen geschieht, ließen sich Empfindlichkeit und Auflösung noch weiter steigern.

Der weitreichendste Vorschlag aber lautet, ein LMT auf dem Mond zu bauen. Nachtschwarzer Himmel, keine atmosphärischen Turbulenzen, keine Wirbel über der Flüssigkeitsoberfläche – das wären ideale Bedingungen. Ein Teleskop, das nahe der Mondpole aufgestellt würde, könnte monatelang dasselbe Himmelsfeld im Blick behalten und selbst die schwächsten und fernsten Objekte entdecken.

Ein Mond-LMT in Leichtbauweise könnte bis zu 100 Meter groß werden. Die bisherigen Konzepte müsste man allerdings stark überarbeiten. Statt des Quecksilbers, das auf dem Erdtrabanten gefrieren würde, müsste man Ionenflüssigkeiten verwenden, die bei niedrigen Temperaturen nicht verdampfen. Ein Metallfilm könnte dann dafür sorgen, dass ihre Oberfläche das Licht reflektiert. Luftlager kommen ebenfalls nicht in Frage, weil sie stets Nachschub an Luft brauchen. Wahrscheinlich würde der Spiegel auf einem Magnetfeld schweben, das von supraleitenden Elementen stabilisiert wird.

Nur ein verrückter Traum? Im Auftrag der US-Raumfahrtbehörde Nasa entwickelt ein internationales Team um Roger Angel von der Universität von Arizona schon jetzt entsprechende Pläne. Sollten sie einst umgesetzt werden, wären auch LMTs mit im Gepäck, wenn wir in eine neue Ära der astronomischen Beobachtung aufbrechen. ◁

**Paul Hickson** lehrt Physik und Astronomie an der Universität von British Columbia im kanadischen Vancouver. Er erforscht Quasare sowie Aktive Galaktische Kerne und entwickelt astronomische Instrumente. Er gehörte zahlreichen Beratungsgremien etwa für die Gemini-Teleskope in Chile und Hawaii und für das James Webb Space Telescope an.

© American Scientist
www.americanscientist.org

The Large Zenith Telescope – a 6-meter liquid-mirror telescope. Von Hickson, P. et al. in: Publications of the Astronomical Society of the Pacific 119, 444, 2007

Deposition of metal films on an ionic liquid as a basis for a lunar telescope. Von E. F. Borra et al. in: Nature 447, 979, 2007. http://dx.doi.org/10.1038/nature05909

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/940436.

# Ein Physiker mit FERNWIRKUNG

Anton Zeilinger jongliert mit den Rätseln der Quantenwelt. Er lässt Makromoleküle interferieren, erzeugt verschränkte Photonen und überträgt damit Quantendaten kilometerweit.

Der Experimentalphysiker Anton Zeilinger (rechts) im Gespräch mit Spektrum-Mitarbeiter Michael Springer

Von Michael Springer

Wer Anton Zeilinger an seinem Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) in Wien besucht, betritt geschichtsträchtigen Boden. Der Gebäudekomplex in der Boltzmanngasse beherbergte schon in der Monarchie physikalische Institute, auf dem Dach prangt noch immer eine Krone, und über einem Eingang waren noch in den 1960er Jahren, als ich dort Theoretische Physik studierte, die Spuren der Lettern »k.u.k.« zu ahnen. Nur ein paar Schritte, und man steht am Kopf der Strudlhofstiege, nach der Heimito von Doderer seinen bekanntesten Roman benannte.

Als geschichtsträchtig erwies sich mein Besuch in Wien auch in einem engeren, biografischen Sinn. Wie sich im Gespräch herausstellte, studierte Zeilinger nicht nur am selben Institut, sondern hatte davor auch dasselbe Gymnasium besucht, und dort hatte uns derselbe Physiklehrer für die Naturforschung begeistert. Während es mich jedoch im späteren Leben in Richtung Strudlhofstiege zog, zu Literatur und Publizistik, konzentrierte sich Zeilinger beharrlich und äußerst erfolgreich auf eine Serie raffinierter Experimente zu Grundfragen der Quantenphysik, die weltweit Aufsehen erregt haben.

Die prinzipielle Originalität seiner Arbeiten besteht – abgesehen von ihrer handwerklichen Raffinesse – darin, dass sie reine Gedankenexperimente, mit denen sonst Theoretiker im Streit um die Interpretation der Quantentheorie zu argumentieren pflegen, tatsächlich zu realisieren vermochten. Dieser Brückenschlag zwischen Theorie und Experiment ist schon für sich bemerkenswert, denn innerhalb der Physik scheint es so etwas wie zwei Kulturen zu geben, eine theoretische und eine experimentelle. Die reine Theorie setzt den Anspruch der *philosophia naturalis* fort, die im Untertitel von Newtons »Principia mathematica« vorkommt, dem Gründungsdokument der theoretischen Mechanik; da wird ein naturphilosophischer Anspruch mit Mitteln der Mathematik und Physik weiterverfolgt. Hingegen ist die Experimentalphysik naturgemäß praxisnah und technisch. Normalerweise sind Physiker entweder Theoretiker oder Experimentatoren – doch Zeilinger hat in seinen Versuchen so etwas wie experimentelle Theorie praktiziert.

**Insbesondere geht es um die Frage,** ob ein Phänomen wie die »Verschränkung« von Quantenzuständen über makroskopische Entfernungen hinweg im Rahmen der klassischen Physik erklärt werden muss – worauf Einstein und Schrödinger beharrten – oder ob es sich um ein spezifisch nichtlokales Quantenphänomen handelt, wie Bohr und Heisenberg behaupteten. Was Einstein in seiner legendären, mit Gedankenexperimenten ausgetragenen Debatte um die richtige Deutung der Mikrophysik abwehrend »spukhafte Fernwirkung« nannte, hat Zeilinger praktisch demonstriert. Es gelang seinen Teams, mit verschränkten Photonen Quanteninformation quer über die Donau und schließlich über mehr als hundert Kilometer zwischen zwei Inseln zu übertragen. Da identische Quantenteilchen anders als klassische Partikel prinzipiell ununterscheidbar sind, kommt dieser Informationstransfer einer Teleportation gleich oder dem »Beamen« aus der Fernsehserie »Raumschiff Enterprise«. Mit solchen Versuchen vermochte Zeilinger theoretische Debatten über das skurrile Verhalten der Quantenwelt in experimentelle und technisch nutzbare Praxis zu übersetzen. Wichtige Forschungsgebiete wie Quantenkryptografie und Quantencomputer profitieren von seinen Arbeiten.

ALLE FOTOS DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / JACQUELINE GODANY

**Spektrum:** Herr Professor Zeilinger, wie kamen Sie überhaupt auf die Idee, Naturforscher zu werden?

**Zeilinger:** Offenbar war ich immer schon so interessiert an den Dingen, dass sich andere Leute darüber wunderten. Wir wohnten auf dem Land, in Niederösterreich, und mein Vater war Lehrer an einer kleinen landwirtschaftlichen Schule. Er leitete dort ein chemisches Laboratorium und war ein so guter Wissenschaftler, dass er später Professor an der Hochschule für Bodenkultur wurde. Ich durfte gelegentlich zu ihm ins Labor kommen und habe als etwas Natürliches miterlebt, dass Leute forschen. Das machte mich neugierig.

Wir wohnten in einem Schloss – einer Dienstwohnung dort, wo auch die Schule war – in riesigen Zimmern, eines allein hatte 150 Quadratmeter. Das war im Winter nicht zu heizen, damals war dafür ja kein Geld da; es kam vor, dass ich morgens aufwachte, und das Wasser im Glas neben meinem Bett war gefroren. So was gibt's! *(lacht)*

Als Kind hatte ich den Blick aus dem zweiten Stock dieses Schlosses, und vis-a-vis lagen die Molkerei und eine große Stallung, die auch zu diesem Lehrbetrieb gehörten. Das Fenster war vergittert, und an diesem Gitter wurde ich angebunden, damit mir nichts passierte. Da habe ich stundenlang hinausgeschaut – und zwar so lange, dass die Leute im Dorf sagten: Mit dem stimmt irgendetwas nicht. Diese Wurzel der Wissenschaft, das Staunen, das bekam ich offenbar von Anfang an mit.

**Spektrum:** So kommt ein Kind dazu, die Natur interessant zu finden – und die Menschen, die sie erforschen. Sie, Herr Zeilinger, sind Experimentator, doch für Ihre Arbeit ist gerade typisch, dass Sie Gedankenexperimente der Theoretiker praktisch realisieren.

**Zeilinger:** Ich habe früh begonnen zu basteln, aber nicht, um etwas zu machen, das funktioniert – das hat mich nie interessiert –, sondern um zu wissen, wie etwas funktioniert. Das ging bis zum Demontieren der Arme und Beine der Puppen meiner Schwester, weil ich genau wissen wollte, wie es da drinnen aussieht.

Im Gymnasium ist dieses fundamentale Interesse dann gefördert worden. Das war ein Humanistisches Gymnasium, und für mich gab es im Unterricht zwei Highlights. Das eine war Physik; ich hatte das Glück, einen wirklich begeisternden Physiklehrer zu haben. Heute ist ja Pädagogik ein großes Fach an den Universitäten, wo man entsprechende Techniken lernt, aber da ist es in meinen Augen oft schon zu spät. Man sollte Feldforschung machen und fragen: Welche Lehrer gibt es, die im Stande

**Anton Zeilinger** wurde 1945 in Ried im Innkreis (Österreich) geboren. Er studierte an der Universität Wien Physik und Mathematik und promovierte 1971 mit einer Arbeit über Neutronenphysik. Sein Team konnte erstmals Quanteninterferenz an großen Molekülen nachweisen. Seit den 1990er Jahren untersuchte er das Wesen von verschränkten Lichtteilchen und nutzte sie zur Übertragung von Quanteninformation (so genannte Teleportation). Zeilinger war Professor am Massachusetts Institute of Technology (MIT, Cambridge), der TU München, der TU Wien, der Universität Innsbruck und des Collège de France in Paris. Derzeit ist er Wissenschaftlicher Direktor am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) sowie Dekan der Fakultät für Physik der Universität Wien.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

## GLOSSAR

- Die klassische Physik umfasst die Theorien vor dem Aufkommen der Quantenphysik – die Newton'sche Mechanik, die Einstein'sche Relativitätstheorie und die Maxwell'sche Theorie des Elektromagnetismus.
- **Die Verschränkung** ist ein typisches »nichtklassisches« Quantenphänomen. Unter bestimmten Bedingungen bilden beispielsweise zwei Photonen nach Verlassen ihres Erzeugungsorts ein zusammenhängendes System mit gemeinsamem Quantenzustand.
- **Der lokale Realismus** war für Einstein eine unabdingbare Voraussetzung jeder vernünftigen physikalischen Theorie. Physikalische Phänomene müssen demnach nicht nur »real« – unabhängig vom Beobachtungsvorgang – existieren, sondern auch »lokal« sein, das heißt prinzipiell separierbar von anderen Phänomenen.
- **Ockhams Rasiermesser,** benannt nach Wilhelm von Ockham (1285 – 1349), besagt: Unter konkurrierenden Theorien ist stets diejenige vorzuziehen, die mit den wenigsten Entitäten auskommt.

sind, die Schüler zu begeistern – und von diesen Lehrern lernen. Alles andere, bis zum computerprogrammierten Lernen, halte ich für sekundär. Ich bin zum Beispiel ein glühender Gegner von Skripten in Vorlesungen.

Das zweite Highlight war Griechisch. Wir lasen Antigone von Sophokles und die Verteidigungsrede des Sokrates; da erlebte ich ganz konkret, dass die menschlichen Probleme, die der Einzelne hat, vor zweieinhalbtausend Jahren haargenau die gleichen waren wie heute. Also auch hier stößt man auf fundamentale Fragen.

**Spektrum:** Wie ist es dazu gekommen, dass in Ihrem Fall Theorie und Experiment in einer Person so nahtlos vereint werden?

**Zeilinger:** Für mich gibt es nicht den Unterschied zwischen Theorie und Experiment, sondern den zwischen Leuten, die fundamentale Fragen stellen, und denen, die damit etwas ganz Bestimmtes machen wollen. Man könnte Letztere als Bastler bezeichnen – egal, ob sie ein Experiment aufbauen oder theoretisch etwas herleiten; es gibt unter Theoretikern genauso viele Leute, die sich nicht für fundamentale Fragen interessieren, wie unter Experimentatoren. Und das ist auch okay so.

Durch die Entwicklung im Zweiten Weltkrieg und danach kam es nicht nur zur Emigration der Physiker aus Europa, sondern auch dazu, dass sie in der militärischen Forschung so erfolgreich waren. Sie zeigten: Wir können etwas »basteln«, das kriegsentscheidend ist. Dadurch hat die pragmatische Seite der Physik ein viel stärkeres Gewicht bekommen, als es eigentlich sein sollte. In den USA gibt es zu wenige Physiker, die nicht diese pragmatische Seite verfolgen; aber neue Entwicklungen können nur von fundamentalen Positionen herkommen, aus tiefen, konzeptiv-philosophischen Fragestellungen. Wie wir wissen, haben sich Einstein, Schrödinger und Heisenberg sehr gründlich mit Philosophie auseinandergesetzt. Das Gegenbeispiel war Dirac, dem es gereicht hat, nur zu rechnen. Beide Positionen sind notwendig, aber momentan kommt mir die fundamentale Seite in der Physik etwas zu kurz.

**Spektrum:** Woher kommt Ihre spezielle Vorliebe für die Grundlagen?

**Zeilinger:** Ich war längere Zeit in den USA am Massachusetts Institute of Technology tätig, und dort habe ich erst bemerkt, was wir hier haben, weil es mir dort gefehlt hat. In Wien habe ich offenbar in der Ausbildung an der Uni das prinzipielle Interesse für Grundsatzfragen mitbekommen – implizit, indirekt. Das geht letztlich zurück auf den Wiener Kreis, auf Ernst Mach und auf Ludwig Boltzmann, der 1903 »Principien der Naturfilosofi« verfasste, in dieser eigentümlichen Orthografie.

**Spektrum:** Zu unserer Studienzeit gehörte die Physik an der Wiener Uni ja noch zur Philosophischen Fakultät, und wir mussten ein Philosophikum absolvieren.

**Zeilinger:** Natürlich. Außerdem war damals der Studienplan sehr frei. Die Verschulung der heutigen Universitäten durch den Bologna-Prozess halte ich für infantil. Da wird bei jedem Wechsel genau geschaut: Hat der drei oder vier Stunden Quantenmechanik gehört. Das ist vollkommen überflüssig. Ich habe in meinem Studium keine einzige Stunde in einer Quantenmechanik-Vorlesung gesessen. Ich habe mir das selbst angeeignet aus Büchern, damals gab's noch kein Wikipedia – zum Glück, Bücher sind besser. Aber zum Prüfer im Rigorosum habe ich dann vorher gesagt, bitte prüfen Sie mich in Quantenmechanik, ich will das lernen.

**Spektrum:** Ihre Arbeiten, Herr Zeilinger, bestätigen ausnahmslos die Vorhersagen der Quantenmechanik und widerlegen alle Versuche, sie klassisch-realistisch zu erklären. Nun gibt es aber heute mehrere Ansätze, die Quantenmechanik adäquat zu interpretieren – die Kopenhagener Deutung, die Vielweltentheorie und Dekohärenzmodelle. Wo liegt da Ihre Präferenz? Trügt der Eindruck, dass Sie ein Anhänger der »orthodoxen« Kopenhagener Deutung sind?

**Zeilinger:** Wir verfügen über eine theoretische Beschreibung der Natur, die unglaublich präzise ist. Es steht überhaupt nicht in Zweifel, dass wir da etwas gefunden haben, das richtig und wahrscheinlich ziemlich endgültig ist. Es kann durchaus eine Entwicklung geben, die eines Tages über die Quantenmechanik hinausgeht – so wie die Relativitätstheorie über die Newton'sche Mechanik. Wenn so etwas kommt, dann ist es wahrscheinlich konzeptiv noch verrückter als die gegenwärtige Quantenmechanik. Aber das Witzige ist, wir haben da eine fantastisch gute Beschreibung der Natur – und dann streiten sich die Leute über die Interpretation! Das heißt für mich, dass wir die konzeptive »Message« noch nicht richtig verstanden haben.

Wir sollten erstens von so wenigen Konzepten wie möglich ausgehen, und wir müssen zweitens alle klassischen Konzepte aufgeben. Die Vielweltentheorie zum Beispiel will den klassischen Realismus retten, und zwar in einer etwas seltsamen Weise: Es gibt viele Realitäten, aber die Vorstellung von der Existenz einer unabhängig von uns gegebenen Wirklichkeit soll gerettet werden. Diese Annahme ist für mich ein klassisches Vorurteil, das wahrscheinlich nicht haltbar ist. Ähnlich die Bohm'sche Interpretation: Die will auch den klassischen Realismus retten. Meine Überzeugung ist, dass wir nur dann wirklich weiter-

kommen können, wenn wir uns fragen: Was sind die minimalen Annahmen, die wir brauchen – und da ist die Kopenhagener Interpretation »the most austere one«, wie ich einmal geschrieben habe, die sparsamste.

**Spektrum:** Was Mach Denkökonomie nannte.

**Zeilinger:** Ja, oder das Prinzip von Ockhams Rasiermesser. Ein Teil unserer Experimente sucht zu identifizieren, welche Konzepte man in der Quantenmechanik beibehalten muss. Vor Kurzem haben wir eine spezielle Abart des nichtlokalen Realismus getestet. Und wie sich zeigt, geht auch das nicht.

**Spektrum:** Haben solche Versuche auch technisch-praktische Konsequenzen für das, was Sie Bastelei genannt haben?

**Zeilinger:** Diese Experimente, die wir und andere machen, sind aus philosophischer Neugier gestartet worden. In Wien begannen wir mit Neutroneninterferometrie, wo ich unter Leitung von Helmut Rauch an der Technischen Universität (TU) mitarbeiten konnte, und später mit verschränkten Photonen. Und zu unserer großen Überraschung stellte sich heraus, dass diese frühen Arbeiten grundlegend wurden für die Entwicklung eines ganz neuen Gebiets der Informationsverarbeitung und -übertragung.

Hätte mich jemand vor fünfzehn Jahren gefragt, wozu das Ganze gut ist, hätte ich offen und ehrlich geantwortet: zu nichts; das ist so sinnvoll wie Astronomie oder eine Beethoven-Symphonie. Das ist eben Wissenschaft, die wir aus Neugier machen. Und genau daraus entsteht jetzt eine neue Informationstechnologie – Schlagworte sind Quantenkryptografie, Quantenteleportation, Quantencomputer –, an der wir sehr intensiv mitarbeiten, bis zu rein technischen Anwendungen.

Das ist ein Lehrstück: In der Geschichte der Physik führten oft Fragen fundamentaler Natur zu Anwendungen, die den Leuten, die die ersten Schritte taten, nicht einmal bewusst waren. Heinrich Hertz machte seine berühmten Experimente zur Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen, um damit den Schlussstein zur Maxwell'schen Theorie zu setzen, ohne dass seine Geldgeber etwas von Anwendungen ahnten. Daraus wurden Radio, Fernsehen und Mobiltelefon. Das kann man den Politikern nicht oft genug sagen: Wenn ihr euer Land langfristig positionieren wollt, müsst ihr Grundlagenforschung fördern, unabhängig von möglichen Anwendungen.

**Spektrum:** Gut, kehren wir zu fundamentalen Fragen zurück. Wenn der lokale Realismus an der Quantenphysik scheitert, dann kann man daraus naturphilosophisch unterschiedliche Konsequenzen ziehen. Wie würden Sie Ihre Position in der Realismusfrage beschreiben?

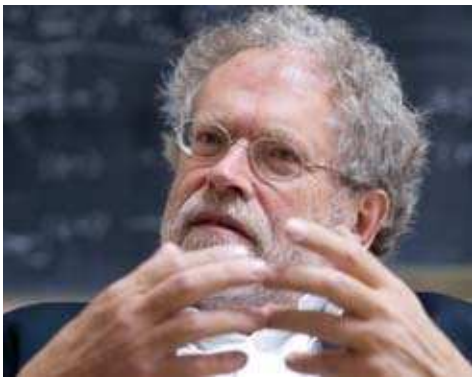
**Zeilinger:** Nach meiner Meinung – und diese setzt sich immer mehr durch – ist nicht die Lokalität, sondern der Realismus das Problem. Wir können grundsätzlich nicht erklären, warum in einem Quantenexperiment gerade das spezifische Messresultat auftritt, das wir beobachten, und nicht ein anderes aus mehreren Möglichkeiten. Wenn ich eine Superposition von vielen Möglichkeiten habe und ich kopple das System an einen klassischen Apparat, dann kann ich die Kohärenz zwischen den verschiedenen Möglichkeiten wegkriegen. Was ich aber nicht erklären kann, ist, warum in einem bestimmten Experiment gerade dieses Resultat auftritt: Wenn ich den Spin in der z-Richtung messe, warum weist er in einem Fall nach oben und im anderen Fall nach unten? Dafür gibt es auch kein klassisches Bild – außer im trivialen Fall, wo der Spin schon vor der Messung in z-Richtung orientiert war.

Das ist für mich eine der wichtigsten Erkenntnisse der modernen Physik überhaupt. Da ist etwas, wofür es keine kausale Erklärung gibt. Ich kann nur für statistische Gesamtheiten etwas kausal erklären, aber nicht für das Einzelereignis. Im Festsaal der Österreichischen Akademie der Wissenschaften steht unter der Allegorie der Philosophie: *causarum investigatio*. Aber für das Einzelereignis gibt es keine *causa*, keine kausale Erklärbarkeit. Nur auf Grund des Messresultats gibt es nachher eine Wirklichkeit. Wenn ich den Spin messe, bekomme ich Spin nach oben, und ab dem Moment, in dem das Messresultat vorliegt, ist das wirklich in dem Sinn: Wenn ich das gleiche Experiment wiederhole, bekomme ich das gleiche Resultat.

Das ist eine zentrale Annahme jeder Naturbeschreibung: Wenn ich das Gleiche unmittelbar nacheinander messe, muss dasselbe herauskommen; sonst hätte der Wirklichkeitsbegriff überhaupt keinen Sinn mehr. Ich vermute, das ist ein ganz zentraler Punkt, der auch in einer Quantenmechanik, die über die jetzige hinausgeht, erhalten bleiben muss. Aber vorher war das nicht Wirklichkeit! Vorher hatte das System im Allgemeinen keinen wohldefinierten Spin!

**Spektrum:** Gar keinen?

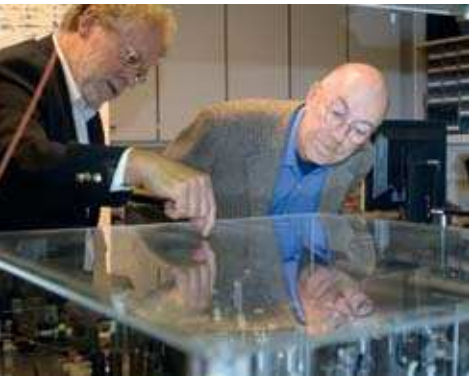
**Zeilinger:** Das System hatte einen quantenmechanischen Zustand. Es war in einer Superposition oder gar Mischung der verschiedenen Möglichkeiten. Im quantenmechanischen Einzelereignis entsteht erst die konkrete Wirklichkeit, die wir dann sehen – und zwar auf zufällige, in keiner Weise kausal beschreibbare Weise. Normalerweise wird aber gleichzeitig eine andere Wirklichkeit vernichtet. Wenn der Spin in der x-Richtung lag, und ich messe ent-



- **Die Kopenhagener Deutung**, formuliert vom dänischen Physiker Niels Bohr und anderen, bestreitet, dass der lokale Realismus in der Quantenwelt gilt. Der Messvorgang verändert demnach das Messobjekt derart, dass von einer beoachtungsunabhängigen Realität keine Rede mehr sein kann. Das Phänomen der Teilchenverschränkung demonstriert zudem die Nichtlokalität der Quantenwelt: Wird eines von zwei verschränkten Teilchen gemessen, so nimmt nicht nur dieses Teilchen einen definitiven Zustand an, sondern zugleich auch das verschränkte Partnerteilchen – sogar wenn beide beliebig weit voneinander entfernt sind.
- **Die Bohm'sche Theorie** versucht den Realismus zu retten und opfert dafür die Lokalität. Das Quantenverhalten von an sich klassisch-realen Teilchen wird durch »verborgene Parameter« und ein nichtlokales Führungsfeld erklärt.

- **Die Vielweltentheorie** beschreibt den Messvorgang als eine Aufspaltung in so viele Welten, wie es mögliche Resultate der aktuellen Quantenmessung gibt. In jeder dieser Welten gibt es einen Beobachter, der eines der möglichen Resultate als wirklich feststellt.
- **Dekohärenzmodelle** beschreiben den Messvorgang als quantenphysikalische Wechselwirkung zwischen Umgebung und Messobjekt, wodurch dessen Zustand, eine »kohärente« Quantensuperposition, ihre Kohärenz einbüßt und in eine statistische Mischung klassischer Zustände übergeht.

Der Quantenphysiker erläutert sein Experiment.



lang z, dann bekomme ich ein eindeutiges Resultat, aber die Wirklichkeit entlang der x-Richtung wird durch die Messung vernichtet.

**Spektrum:** Wenn es so ist, dass uns die Quantenphysik eine nichtrealistische Interpretation nahelegt, heißt das, wir müssen uns an den Gedanken gewöhnen, dass die Wirklichkeit nicht rein materiell ist, sondern eine immaterielle, »geistige« Komponente enthält? Sie betonen oft, dass die Information, die eine Art Zwischenposition zwischen materiell und geistig einnimmt, darum der grundlegende Begriff sei.

**Zeilinger:** Ich bin überzeugt, dass Information das fundamentale Konzept unserer Welt ist. Sie bestimmt, was gesagt werden kann, aber auch, was Wirklichkeit sein kann. In der üblichen Auffassung des Physikers und im täglichen Leben existiert die Wirklichkeit da draußen primär; durch diese Wirklichkeit spazieren wir wie über eine Bühne, und die Information, die wir darüber haben, ist ein sekundäres Konzept. In der Quantenphysik – zumindest in bestimmten Situationen – ist nach meiner Überzeugung die Information das Primäre: das, was gesagt werden kann.

Die Information, die ein Quantensystem trägt, ist beschränkt, ist endlich. Daraus kann man gute Gründe dafür herleiten, dass es den Zufall gibt, Unbestimmtheit, Verschränkung und solche Dinge. Ich habe in einem meiner Bücher geschrieben, dass wir die Trennung zwischen Information und Wirklichkeit aufgeben müssen. Als Physiker haben wir gelernt, dass wir Trennungen aufgeben müssen, wenn wir sie operativ nicht durchführen können – beispielsweise Raum und Zeit in der Relativitätstheorie, elektrisches und magnetisches Feld in Maxwells Theorie oder irdische und Himmelsmechanik in der Newton'schen Physik. Analog könnten Information und Wirklichkeit zwei Seiten derselben Münze sein. Ich kann über Wirklichkeit keine Aussage machen, ohne über Information zu reden. Beide sind ineinander verwoben. Was das letztlich bedeutet, wissen wir noch nicht.

**Spektrum:** Ist das so wie bei Kant, der sagt, unser Erkenntnisapparat präformiert, was wir überhaupt erkennen können? Das heißt, einiges von dem, was wir als »da draußen« identifizieren, ist eigentlich bei uns »da drinnen«. Raum und Zeit sind nach Kant eigentlich Vorformen der Realitätswahrnehmung, die wir nicht da draußen beim Ding an sich suchen sollten, sondern in unserem Verstandesapparat.

**Zeilinger:** Er präformiert auch, was da draußen sein kann.

**Spektrum:** Ist dann überhaupt etwas da draußen? Hat es Sinn, nach so etwas zu fragen?

**Zeilinger:** Natürlich. Wenn ich sage, dass Information und Wirklichkeit zwei Seiten derselben Münze sind, dann bin ich nicht reiner Idealist. Ich darf weder ein idealistischer noch ein materialistischer Reduktionist sein.

**Spektrum:** Sie setzen Information nicht gleich mit Wirklichkeit? Sie sagen nicht: Was wir bisher als Wirklichkeit betrachtet haben, ist eigentlich Information?

**Zeilinger:** Nein, das wäre mir zu idealistisch.

**Spektrum:** Hat für Sie die Wirklichkeit im Licht der Quantenmechanik eine gleichsam spirituelle Komponente, wie etwa die Weltreligionen das seit jeher lehren? Darf ich die Gretchenfrage stellen: Wie hältst du's mit der Religion?

**Zeilinger:** Haben wir dafür ein paar Stunden Zeit? *(lacht)* Religion und Gott sind natürlich zu unterscheiden. Alle Religionen leiden darunter, dass sie weltliche Organisationen sind, dass sie glauben, Traditionen pflegen zu müssen. Ich habe viel mit Katholiken diskutiert – mit den Kardinälen König und Schönborn –, mit dem Dalai-Lama, mit Griechisch-Orthodoxen und Protestanten. Da gibt es zwei Klassen von Leuten: die einen, die im persönlichen Gespräch sehr wohl eigene Positionen vertreten, oder andere, die auch dann lieber zur offiziellen Linie halten.

Ich sehe auch in diesen spirituellen Traditionen einen Weg des Wissens, parallel zur Naturwissenschaft, auf dem man etwas lernen kann über die Welt. Jeder Konflikt zwischen Religion und Wissenschaft ist in meinen Augen ein Missverständnis. Die Diskussion über Evolution versus Kreationismus ist intellektuell erschreckend – sowohl, was von fundamentalistischen Vertretern der Religion gerade in den USA vertreten wird, als auch zum Teil von Seiten der Naturwissenschaftler; das Buch von Richard Dawkins, »The God Delusion«, ist so simplifizierend! Weder Religion noch Naturwissenschaften werden je die Existenz Gottes beweisen oder widerlegen können.

Das ist wie in dem berühmten Witz: Unter den Schriftgelehrten bricht Streit aus, welcher Gottesbeweis zulässig ist, und schließlich sagt der älteste, von allen respektierte Rabbi: Ich verstehe euren Streit nicht! Der Herr ist so groß, er hat es nicht nötig zu existieren!

Mir gefällt die Einstein'sche Position, dass Gott dasjenige Prinzip ist, von dem die Naturgesetze kommen – wobei ich mir durchaus einen Gott vorstellen kann, der in die Welt noch heute eingreifen kann …

**Spektrum:** … was Einstein nicht glaubte.

**Zeilinger:** Ja, soviel ich weiß, hat Einstein Gott nur am Anfang eine Rolle zugeordnet.

**Spektrum:** Ihm zufolge hat Gott dieses großartige Uhrwerk in Gang gesetzt, greift aber nicht in den Ablauf ein, etwa wegen eines Gebets.

**Zeilinger:** Ich weiß zumindest, dass die Welt kein Uhrwerk ist. Die Quantenmechanik

lehrt uns, dass jedes Uhrwerk-Bild falsch ist. Die Naturwissenschaftler haben uns ja weniger gesagt, wie wir die Welt sehen sollen, sondern, wie wir die Welt nicht sehen können. Kopernikus hat uns gezeigt, dass die Erde nicht im Mittelpunkt des Universums steht. Darwin hat uns gesagt: Der Mensch ist nicht etwas Besonderes.

**Spektrum:** Die haltbaren Aussagen sind Negativaussagen. Nach Einstein ist es unmöglich, träge und schwere Masse zu unterscheiden.

**Zeilinger:** Genau. Und genauso gilt: Die Welt ist kein Uhrwerk. Über die theologischen Konsequenzen möge man sich einmal den Kopf zerbrechen. *(lacht)*

**Spektrum:** Lassen Sie uns noch einmal zu dem zurückkehren, was Sie die Bastelseite der Naturwissenschaft genannt haben. Basteln ist eine ehrenwerte Beschäftigung. Sie sind ja kein Mensch wie Einstein, der mit Papier und Bleistift agiert hat, sondern ein Experimentator.

**Zeilinger:** Experimente sind mein Hauptgeschäft. Die philosophischen Fragen sind eine Nebenschiene, ein Hobby …

**Spektrum:** … obwohl Ihr Ausgangsinteresse ein fundamentales ist.

**Zeilinger:** Ja, das war damals eine Schlüsselentscheidung. Wir hatten einen sehr freien Studienplan, es gab kein Diplom. Ich finde, es ist ein Jammer, dass so viel Zeit in die Ausbildung gesteckt wird; die jungen Leute brauchen einfach viel zu lange, bis sie fertig sind. Da müssen sie eine Diplomarbeit schreiben, die ist zum Teil schon auf dem Niveau einer Dissertation. Das halte ich für überflüssig.

Als ich vor der Entscheidung stand, wo machst du deine Dissertation, habe ich etwas damals Unerhörtes gemacht: Ich habe herumgefragt, welche Physikprofessoren in Wien als die besten gelten. Da sind zwei Namen übrig geblieben, der Theoretiker Walter Thirring an der Uni und Helmut Rauch an der TU.

Rauch war ein Jungstar, der mit Neutroneninterferometrie experimentierte, und ich ging zu ihm an die TU, weil ich in der Physik nicht den Kontakt zur Wirklichkeit verlieren wollte. Ich wollte Experimente machen. Das rein theoretische Arbeiten war mir zu wenig. Es gibt nichts Schöneres, als im Labor zu stehen und ein Phänomen als Erster zu sehen. Das ist nicht Stolz, sondern ein Glücksgefühl; genauso muss es sein, wenn ein Komponist eine schöne Passage zu Stande bringt.

**Spektrum:** Da wird die Neugier des Kindes befriedigt, das damals am Fenstergitter hing.

**Zeilinger:** Ja, das ist die Freude des Entdeckens. Und jetzt die spannenden Experimente mit Quantenkommunikation über große Entfernungen – so etwas zu machen, ist einfach schön. Zwischen zwei Kanarischen Inseln, La Palma und Teneriffa, kann man wirklich über 144 Kilometer hinweg einzelne Photonen übertragen und identifizieren, obwohl man die andere Insel nur mehr unklar im Dunst sieht – aber der quantenmechanische Zustand bleibt voll erhalten. Unser Ziel ist die satellitengestützte Quantenkommunikation; da sind wir nicht nur reine Experimentatoren, die philosophische Fragen stellen, sondern da entwickeln wir konkret die Hardware für Satellitenexperimente.

**Spektrum:** Verfolgen Sie noch andere Projekte?

**Zeilinger:** Wir forschen in Richtung mikromechanische Hebel. Winzige mechanische Hebel im Nanobereich oszillieren bei normalen Temperaturen. Man versucht sie nun so weit zu kühlen, dass man ihre Quantenzustände sehen kann. Gewissermaßen wird die Mechanik in die Quantenmechanik zurückgebracht. Das wäre das erste Mal, dass ein mechanisches System – ein Hebel – Quantenzustände zeigt. Man versucht, Verschränkung zwischen Hebeln zu zeigen, und vielleicht lässt sich das für Quantencomputer nutzen.

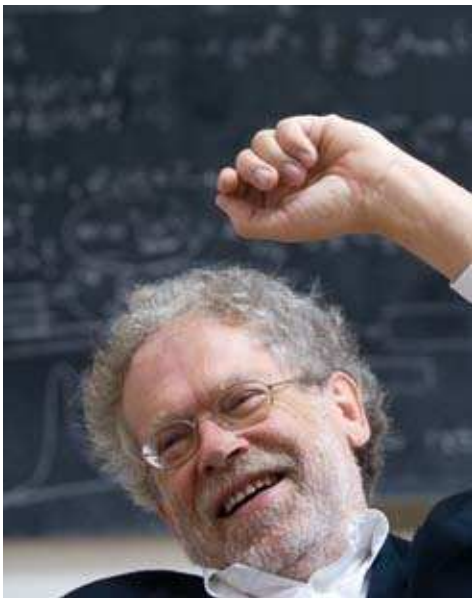
**Spektrum:** Sie haben ja auch Quanteninterferenz an Makromolekülen demonstriert und angekündigt, das mit Viren zu machen, also bis an die Grenze von Lebewesen.

**Zeilinger:** Ich bin überzeugt, dass man das auch mit Lebewesen machen kann. Es gibt keinen prinzipiellen Grund, warum das nicht funktionieren sollte. Dieses Arbeitsgebiet läuft weiter, aber ich habe es vollständig abgegeben an einen jungen Kollegen, Markus Arndt.

**Spektrum:** Was geben Sie Ihren Studenten als Quintessenz Ihrer experimentellen Praxis mit?

**Zeilinger:** Ich versuche immer, ein einzelnes Phänomen möglichst klar herauszuarbeiten und zu isolieren – es überzeugend zu machen. Man soll nicht erst über Zwischenschlüsse um zwei Ecken sagen können: »Das ist es!«, sondern es mit möglichst einfachen Mitteln klar identifizieren. Ich finde da eine Parallele zu den Künsten – in der Malerei die Dinge mit möglichst einfachen Mitteln darzustellen oder im Jazz mit möglichst wenigen Taktschlägen den Rhythmus rüberzubringen.

Ich gebe mich nicht zufrieden, wenn ein Experiment ungefähr vorliegt. Sondern jedem kleinen Detail wird nachgegangen, bis man es ganz versteht. Für die Experimente, die wir machen, soll nachher kein anderes Experiment mehr nötig sein. That's it! Nicht ein hastiger erster Beweis und dann sehen wir weiter – das ist nicht mein Stil. Das hat sich sehr bewährt: Die Dinge noch genauer zu machen, als es eigentlich notwendig scheint. Dadurch werden sie schöner, und dadurch kann man oft etwas im Experiment sehen, das man gar nicht vorhatte. ◁



**»Über die theologischen Konsequenzen möge man sich einmal den Kopf zerbrechen«**

**Michael Springer**, der die Fragen stellte, ist Wissenschaftsredakteur und freier Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

Einsteins Spuk. Von Anton Zeilinger. Goldmann, München 2007

Einsteins Schleier. Von Anton Zeilinger. Goldmann, München 2005

Quanten-Teleportation. Von Anton Zeilinger in: Spektrum der Wissenschaft 6/2000, S. 30

An experimental test of non-local realism. Von Simon Gröblacher et al. in: Nature, Bd. 446, S. 871, 2007

Experimental test of quantum-nonlocality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement. Von Jian-Wie Pan et al. in: Nature, Bd. 403, S. 515, 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/940409.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

**SERIE Gehirn und Bewusstsein**

Wie erzeugt unser Gehirn Bewusstsein? Die Artikel der Serie beleuchten diese spannende Frage aus verschiedenen Blickwinkeln.

Teil I: Fenster ins Gehirn
Teil II: Neuronale Repräsentation von Bewusstsein
Teil III: Was ist Bewusstlosigkeit?
Teil IV: Hirnfunktion im Wachkoma

# WACH UND DOCH BEWUSSTLOS

Mit raffinierten Gehirnaufnahmen können Neurologen heute das Wachkoma und seine Übergangsformen zuverlässiger diagnostizieren.

Von Steven Laureys

Dank der Fortschritte in der Unfall- und Intensivmedizin überleben immer mehr Menschen eine plötzliche schwere Hirnschädigung: große Kopfverletzungen durch Unfall – so genannte Schädel-Hirn-Traumata –, auch Hirnschäden zum Beispiel infolge Sauerstoffmangels bei Herzstillstand oder einem Fast-Ertrinken. Gelingt es den Ärzten, das Leben solcher Patienten zu retten, dann sinken diese zunächst für einige Zeit in ein so genanntes Koma, in einen Zustand tiefster Bewusstlosigkeit. Sie öffnen dann nicht die Augen und bewegen Arme oder Beine allenfalls reflexhaft.

Selten dauert dieses Koma länger als zwei bis fünf Wochen. Falls die Patienten wieder zu Bewusstsein kommen, geschieht das in der Regel schon in den ersten Tagen. Viele Betroffene sterben. Manche aber erwachen zwar aus dem Koma, doch sie bleiben dabei bewusstlos: Sie geraten in einen so genannten vegetativen Zustand, auch als Wachkoma bezeichnet. (Bei Medizinern ist auch noch der Ausdruck apallisches Syndrom gebräuchlich. Als generelle Beschreibung des Zustands dieser Patienten lehnt der Autor dieses Artikels das aber ab; *die Redaktion*).

Patienten im Wachkoma wirken selbst auf Mediziner und Neurologen immer wieder hochgradig irritierend. Diese Menschen durchleben Schlaf- und Wachzyklen, doch fehlen Vorgänge wie Denken und Fühlen. Die eine der beiden Hauptkomponenten von Bewusstsein, das Wachsein, hat sich von der zweiten, dem Gewahrsein – der Bewusstheit –, vollständig abgekoppelt. Wenn die Patienten wach zu sein scheinen, halten sie die Augen offen und bewegen sie auch manchmal. Dann wieder haben sie sie geschlossen und scheinen zu schlafen. Berührt man sie dann oder spricht sie an, kann es sein, dass sie die Augen öffnen und sich regen.

Wachkomapatienten atmen normalerweise allein, ohne apparative Unterstützung. Auch zeigen sie eine Reihe von Spontanregungen, wie Zähneknirschen, Schlucken, Weinen, Lächeln, eine Hand fassen, Grunzen oder Stöhnen. Solche Verhaltensweisen sind aber nie willentlich gesteuert, sondern nur Reflexe. Charakteristisch ist auch, dass die Patienten nichts länger mit den Augen fixieren. Gelegentlich kommt es vor, dass sie einem bewegten Gegenstand kurz mit dem Blick folgen oder flüchtig zu einer lauten Geräuschquelle blicken.

Viele dieser Kranken erlangen im ersten Monat nach dem Unfall ihr Bewusstsein wieder. Andernfalls sprechen Mediziner nun von einem persistierenden (andauernden) vegetativen Zustand. Je länger das Wachkoma anhält, umso unwahrscheinlicher wird der Betreffende erfahrungsgemäß wieder zu sich kommen. Ein amerikanisches Expertengremium befand im Jahr 1994, dass die Chancen auf Wiedererlangung des Bewusstseins bei

## LEXIKON

**Koma:** Tiefe Bewusstlosigkeit, wirkt nur äußerlich wie Tiefschlaf. Patient lässt sich nicht wecken.

**Wachkoma oder vegetativer Zustand:** Patient hat einen Wach-Schlaf-Rhythmus, behält zwischendurch lange die Augen offen, zeigt keinerlei Regungen oder Hirnaktivitäten, die auf Bewusstsein schließen lassen.

**Zustand minimalen Bewusstseins:** Patient zeigt gewisse Bewusstseinsregungen, obwohl er meist wie ein Wachkomapatient wirkt.

**Es fällt schwer, einem Menschen im Wachkoma das Bewusstsein abzusprechen – denn zwischendurch bewegt er sich, erzeugt Laute und Geräusche und hat die Augen offen.**

einem Schädel-Hirn-Trauma nach einem Jahr gegen null gehen, wenn bis dahin keinerlei Anzeichen einer Bewusstheit aufgetreten sind. Bei Schädigung durch Sauerstoffmangel oder andere nicht traumatische Einflüsse nannten die Experten als Zeitspanne zuerst drei, später aber sechs Monate. Für ein so lang anhaltendes Wachkoma prägte das Gremium die Bezeichnung permanenter (ständiger) vegetativer Zustand.

## Streben nach sicherer Diagnose

Viele dürften sich an den Fall von Terri Schiavo erinnern, eine US-Bürgerin aus Florida, die seit 1990 im Wachkoma lag. Gegen die Eltern konnte ihr Mann im Jahr 2005 schließlich durchsetzen, dass sie keine Nahrung und Flüssigkeit mehr erhielt und starb. Die hitzige Debatte hierzu zeigte, wie dringend nötig noch bessere Diagnosen sind, um sicher festzustellen, ob sich ein Wachkomapatient wirklich in einem permanent vegetativen Zustand befindet oder ob nicht doch noch etwas Hoffnung besteht.

Forscher untersuchen, inwieweit die modernen Bildgebungsverfahren von Hirnaktivität darüber Aufschluss geben, auch wenn der Patient sonst keinerlei Regungen zeigt, die auf ein noch so geringes Bewusstsein hindeuten. Mit Methoden, die solche schwachen, versteckten Bewusstseinsvorgänge aufzeigen, könnten die Ärzte aufdecken, wie gut oder schlecht die Aussichten auf Besserung sind. Solche Forschungen könnten zudem neue Erkenntnisse über die neuronalen Grundlagen des Phänomens Bewusstsein liefern.

Oft wacht der Patient aus einem Wachkoma ganz allmählich auf, und die ersten Anzeichen dafür sind kaum fassbar. Vielleicht macht er anfangs einige Bewegungen, die nicht reflexhaft, sondern gesteuert wirken, vermag aber noch nicht Gedanken oder Gefühle auszudrücken oder sie zu kommunizieren. Dieses Stadium nennen Ärzte einen minimalen Bewusstseinszustand. Wie beim rein vegetativen Zustand handelt es sich dabei manchmal um eine Übergangsphase, und der Kranke erholt sich bald noch weiter. In anderen Fällen währt dieses Stadium viel länger. Mitunter bessert sich das Befinden nie noch weiter. Trotzdem gibt es einen wesentlichen Unterschied zum reinen Wachkoma: Auch nach Jahren im Zustand minimalen Bewusstseins besteht immer noch Hoffnung auf Besserung. Bekannt wurde der Fall des Amerikaners Terry Wallis aus Arkansas. Nach einem Verkehrsunfall im Jahr 1984 lebte er fast zwei Jahrzehnte in diesem Zustand. Doch 2003 fing er wieder an etwas zu sprechen. Heute kann er Arme und Beine ein wenig gebrauchen, ist aber nicht fähig zu gehen und benötigt weiterhin Vollzeitpflege.

Ob ein Patient im Wachkoma liegt oder ein Minimalbewusstsein erlebt, ist oft äußerst schwer zu beurteilen. Die Diagnose erfordert wiederholte Untersuchungen und viel ärztliche Erfahrung. Auf ein rein vegetatives Sta-

# In Kürze

- Nach einer schweren Hirnschädigung gleiten viele Betroffene aus dem anfänglichen Koma in ein so genanntes Wachkoma, in einen **vegetativen Zustand**, in dem sie zwar wach, aber bewusstlos sind. Dauert der Zustand länger als ein Jahr, bestehen meist kaum noch Chancen auf Besserung.
- Fortschrittliche Bildgebungsverfahren für Hirnaktivität sollen eine verlässliche Diagnose des Hirnzustands der Patienten ermöglichen, vor allem auch aufzeigen, ob noch ein **Minimalbewusstsein** oder eine Rückkehr zum Bewusstsein auftreten könnte.
- Solche Aufzeichnungen lieferten einige erstaunliche neue Hinweise auf **Mechanismen des Bewusstseins**.

## KOMA UND WACHKOMA

- Schätzungsweise 40000 Menschen dürften in Deutschland pro Jahr länger als eine Woche in ein Koma fallen.
- Eine offizielle Statistik zur Zahl von Wachkomapatienten in Deutschland gibt es nicht. Nach einer Schätzung könnten sich rund 5000 Menschen in einem permanenten Wachkoma befinden.

dium schließen Ärzte, wenn sie trotz wiederholter gezielter Tests keinerlei Verhaltensanzeichen für ein Restbewusstsein feststellen können. Vereinfacht gesagt: Der Patient erscheint zwischendurch wach, da er die Augen offen hält, macht aber nur Reflexbewegungen. Anweisungen, wie eine Hand zu drücken oder nach unten zu schauen, befolgt er nie.

Anfang der 1990er Jahre wiesen Nancy Childs vom Gesundheits-Rehabilitationszentrum in Austin (Texas) und Keith Andrews vom Royal Hospital für Neuroinvalidität in London nach, dass mehr als ein Drittel der Patienten mit der Anfangsdiagnose vegetatives Stadium bei eingehender Untersuchung doch gewisse Anzeichen von Bewusstsein zeigen. Solch ein Befund beruht auf standardisierten, eigens zu diesem Zweck entwickelten klinischen Tests. Mit ihnen prüfen Ärzte die Reaktionen auf eine breite Auswahl an akustischen, visuellen und taktilen Reizen. Beispiele solcher Testbatterien sind die Coma Recovery Scale, entwickelt von Joseph Giacino am JFK Johnson Rehabilitation Institute in Edison (New Jersey), oder die Sensory Modality Assessment Rehabilitation Technique nach Helen Gill-Thwaites von der oben genannten Londoner Klinik. Zweifellos sind diese Verfahren neurologischen Routineuntersuchungen überlegen und auch aussagekräftiger als einfachere Schemata wie die Glasgow Coma Scale, dafür aber wesentlich zeitaufwändiger.

Als ein subjektives Phänomen lässt sich ein Bewusstseinsgeschehen grundsätzlich von außen schwer erfassen. Wie soll man bei einem nicht ansprechbaren Patienten mit akuter Hirnschädigung sicherstellen, dass man selbst bei sorgsamster Diagnose nicht vielleicht doch minimale Anzeichen eines Gewahrseins übersieht? Um dergleichen auszuschließen, suchen die Forscher schon länger nach einem objektiven Verfahren, das die Diagnose »vegetatives Stadium« bestätigt oder verwirft.

Mit modernen tomografischen Methoden, die allein Strukturen, aber nicht neuronale Aktivität bildlich darstellen, kann man zwar das Ausmaß einer Hirnschädigung sichtbar machen. Anzeichen von Bewusstsein lassen sich mit derartigen Bildern jedoch nicht finden. Nach neueren Erkenntnissen könnten kernspintomografische (MRT-)Aufnahmen bei einem Hirntrauma trotzdem helfen, die Aussichten auf eine Erholung aus dem vegetativen Zustand zu beurteilen. Diese sind offenbar eher schlecht, wenn etwa das Stammhirn verletzt oder der Balken, das Corpus callosum, zwischen den beiden Großhirnhemisphären betroffen ist.

Mit einer neuen bildgebenden Technik, dem so genannten MRT-Diffusionstensor-Imaging (DTI), lässt sich die weiße Hirnsubstanz beurteilen, das heißt die neuronalen Leitungsbahnen. Das Verfahren hilft verstehen, wieso sich das Gehirn manchmal von einem vegetativen Zustand erholen kann. So konnte eine Gruppe um Nicholas Schiff von der Cornell-Universität mit DTI nachweisen, dass bei dem oben erwähnten Patienten Terry Wallis, als er nach 19 Jahren aus einem Zustand minimalen Bewusstseins zu sich kam, neue Neuronenausläufer gewachsen waren.

### Reaktion auf den eigenen Vornamen

Häufig machen Ärzte bei Wachkomapatienten ein EEG, ein Elektroenzephalogramm. An den elektrischen Aktivitätsmustern des Gehirns erkennen sie das Wachheitsstadium – im traumlosen Schlaf ist die Aktivität langsamer. Bei Komapatienten kann man mit einem EEG die klinische Diagnose Hirntod absichern. Auf dem Bildschirm erscheinen dann flache Linien, ein so genanntes Nulllinien-EEG. Die Methode eignet sich weniger, um Veränderungen im Bewusstseinszustand bei Wachkomapatienten zu beurteilen – die ja keineswegs hirntot sind. Weder lässt sich damit ein vermuteter vegetativer Zustand bestätigen noch erlaubt sie Prognosen, ob eine Besserung möglich ist. Zwar wies meine Arbeitsgruppe an der Universität Liège (Lüttich, Belgien) nach, dass das Gehirn von Patienten im Stadium minimalen Bewusstseins mit einem so genannten P300-Potenzial reagiert, wenn man ihren Vornamen sagt – was bei anderen Namen nicht geschieht. Allerdings kommt das auch bei einigen Menschen im chronischen vegetativen Zustand vor. Demnach dürfte ein EEG in dieser Hinsicht diagnostisch wertlos sein.

Am vielversprechendsten erscheinen bildgebende Verfahren, die indirekt Gehirnaktivität abbilden. Fachleute nennen das funktionelles Neuroimaging. Mit Hilfe von Positronen-Emissionstomografie (PET) stellten sie fest, dass der Hirnstoffwechsel – gemessen am Glukoseumsatz – bei Menschen im vegetativen Stadium kaum halb so hoch ist wie normalerweise. Zuerst wies das in den späten 1980er Jahren ein Team um Fred Plum von der Cornell-Universität nach. Wissenschaftler in Europa bestätigten den Befund später mehrfach, so auch meine Arbeitsgruppe.

Wie wir in den späten 1990er Jahren allerdings auch feststellten, tauchen manche Personen aus dem Wachkoma auf, ohne dass der Gesamthirnstoffwechsel beträchtlich steigt. Auch messen wir bei einigen gesunden, wachen Menschen, die bei vollem Bewusstsein sind, ähnlich niedrige Gesamtwerte wie bei manchen Wachkomapatienten. Umgekehrt hat, wie Schiff aufzeigte, die Hirnrinde in

Einzelfällen im vegetativen Stadium einen fast normal hohen Stoffumsatz. Somit eignet sich der allgemeine Energieverbrauch des Gehirns nicht besonders gut, um herauszufinden, ob ein Bewusstsein vorhanden ist.

Das gilt, wie gesagt, für den Hirnstoffwechsel insgesamt. Doch bei genauerem Hinsehen scheint es Hirnareale zu geben, deren Aktivität besser anzeigt, ob der Patient wieder zu sich kommt oder kommen könnte. Wir verglichen die Muster von Wachkomapatienten mit denen vieler gesunder Studienteilnehmer. Dabei entdeckten wir zwischen beiden Gruppen große Unterschiede in den assoziativen Rindengebieten von Stirn- und Scheitellappen, einem weit verzweigten Netz für die geistige Verarbeitung von verschiedenartigen Sinneseindrücken. Wie sich herausstellte, kommunizieren diese Hirngebiete im Zustand des Gewahrseins sowohl miteinander als auch mit tiefer liegenden Regionen, vor allem mit dem Thalamus. Wichtig scheint zu sein, dass jene Regionen funktionellen Kontakt zueinander haben (siehe Kasten S. 48). Bei den von uns untersuchten Patienten im vegetativen Stadium schwiegen die Fernverbindungen zwischen den beiden Großhirnhälften anscheinend – sie waren sozusagen stillgelegt, ebenso die Kontakte zwischen Rindengebieten und Thalamus. Wenn ein Patient aus dem vegetativen Zustand auftaucht, arbeitet das Netz der Stirn- und Scheitelrindengebiete wieder, die anderen Verbindungen ebenso.

Zunächst liefern Messungen der Hirnaktivität an Patienten mit Minimalbewusstsein ein recht ähnliches Bild wie beim vegetativen Zustand. Die Ausfälle gleichen sich offenbar stark. Zumindest solange der Patient ruht, erlaubt die PET-Untersuchung darum keine Unterscheidung beider Zustände. Das ändert sich jedoch merklich, wenn man den Patienten stimuliert, etwa kleine Schmerzreize setzt oder ihn anspricht.

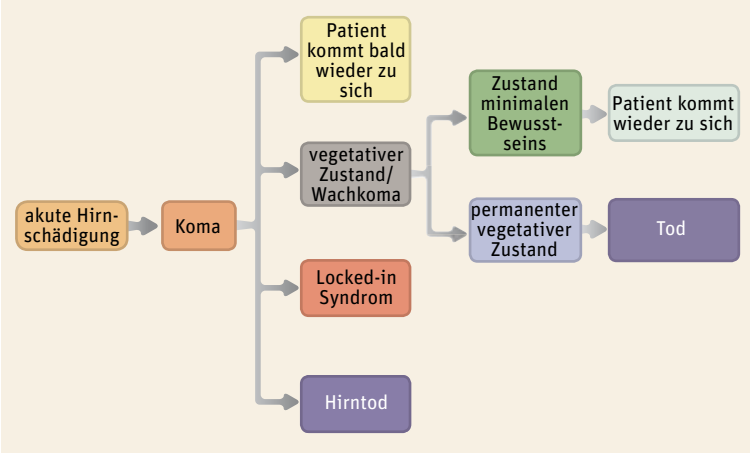
Um die Reaktion auf einen Schmerzreiz zu testen, setzten wir an einer Hand einen elektrischen Reiz – den Kontrollpersonen als schmerzhaft empfanden. Diesmal bestimmten wir mit der PET-Methode den Blutfluss im Gehirn. Bei beiden Testgruppen, den Patienten im vegetativen Stadium wie den gesunden Teilnehmern, bewirkte der Stimulus anscheinend neuronale Aktivität im Hirnstamm, im Thalamus sowie im primären somatosensorischen Kortex, also dort, wo eine solche Sinnesinformation zuerst in der Hirnrinde ankommt. Bei den Kranken reagierten sonst keine weiteren Hirngebiete – bei den Kontrollpersonen natürlich schon. Somit gingen von dem kleinen Rindenbereich, der bei den Patienten allein ansprach, keine Kontakte zu wei-

## Zwischen Koma und Bewusstsein

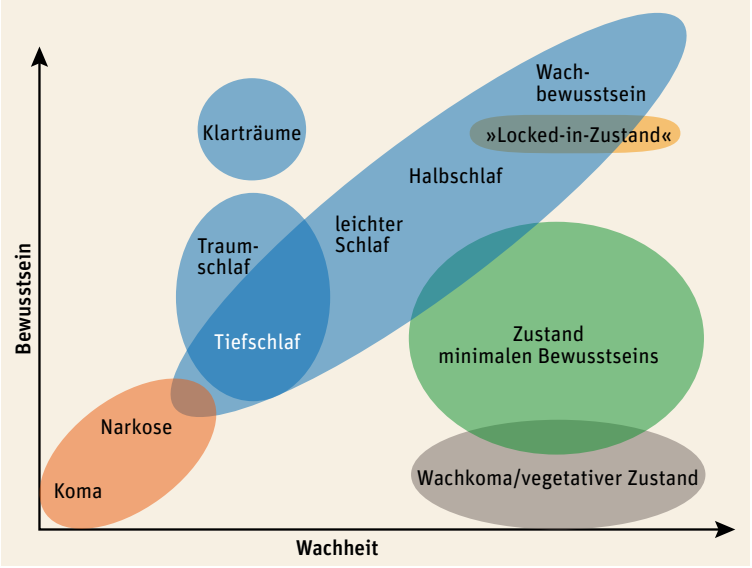
**Abhängig von Art und Grad** einer akuten Hirnschädigung geraten Patienten aus einem anfänglichen Koma nicht selten in einen vegetativen Zustand. Unter Umständen entwickelt sich daraus später ein Zustand minimalen Bewusstseins. Nur ein Teil der Betroffenen kommt nach einiger Zeit wieder voll zu Bewusstsein (oberes Schema).

Charakteristisch ist für Wachkomapatienten, dass sie zwar einen hohen Wachheitsgrad erreichen, aber keinerlei Bewusstsein. Dagegen können Menschen mit einem so genannten Locked-in-Syndrom – die gewissermaßen in ihrem Körper eingeschlossen sind, weil sie sich willentlich nicht regen können – voll wach und bei vollem Bewusstsein sein (unteres Schema)

**mögliche Entwicklung nach einer Hirnschädigung**




**Zusammenspiel zweier Hirnzustände**




BEIDE GRAFIKEN: MELISSA THOMAS

teren Gebieten aus, er blieb isoliert. Insbesondere waren keine Verbindungen zu jenen Neuronennetzen zu erkennen, die vermutlich entscheidend für bewusste Schmerzwahrnehmung sind. Der Befund müsste auch Angehörige von Wachkomapatienten beruhigen: Diese empfinden Schmerz nicht so wie Gesunde.

Auch wenn wir jene Patienten anredeten, erschienen nur solche beschränkten Reaktionsmuster. Diesmal reagierte in der Großhirnrinde allein die primäre Hörrinde, also wiederum die unterste Verarbeitungsebene des Kortex. Höhere Ebenen der Sinnesverarbeitung waren nicht eingeschaltet – sie blieben funktionell abgekoppelt. Nach allem, was man weiß, wird solch ein Patient des Gehörten wirklich nicht gewahr.

Das ist im Zustand minimalen Bewusstseins anders. Bei diesen Patienten können Hörreize in übergeordneten Hirnrindenarealen breit gefächerte Reaktionen auslösen. Nicholas Schiff war der Erste, der bei ihnen eine so genannte funktionelle MRT anwendete, um Hirnaktivitäten aufzuzeichnen. Schiff konnte so tatsächlich nachweisen, dass die neuronalen Netze für Sprache bei diesen Patienten aktiv wurden, wenn eine vertraute Stimme eine Geschichte aus dem Leben des Kranken vortrug. Spielte man die Tonbandaufnahme rückwärts ab, reagierten diese Hirngebiete allerdings nicht – während sie bei gesunden Menschen auch dann ansprechen.

Ein Befund meiner Arbeitsgruppe von 2004 passt zu Schiffs Ergebnis. Wir ließen minimalbewusste Patienten entweder belanglose Geräusche hören oder stimmliche Äußerungen, die das Gefühl anrühren, etwa Kinderweinen oder der gerufene Name des Patienten. Die Stimmen lösten bei ihnen viel breitere Hirnantworten aus. Demnach dürfte es bei der Ansprechbarkeit eines Menschen in diesem Zustand durchaus auf den Gehalt des Gesagten ankommen.

Eine andere Frage war für uns, ob sich solche Hirnaufnahmen eignen, um bei einem Wachkomapatienten ein Minimalbewusstsein sicher auszuschließen. Das würde den Nachweis erfordern, dass komplexe Hörreize bei diesen Patienten nie irgendwelche weit reichenden Hirnreaktionen hervorrufen.

## MEHR DAZU

Ein Wachkoma tritt nicht nur nach Unfällen auf – oder nach längerem Sauerstoffmangel oder langer Unterzuckerung – , sondern kommt auch bei manchen Erkrankungen vor: etwa nach einem **Schlaganfall**, infolge von Hirn- oder Hirnhautentzündung, bei Hirntumoren oder degenerativen Erkrankungen.

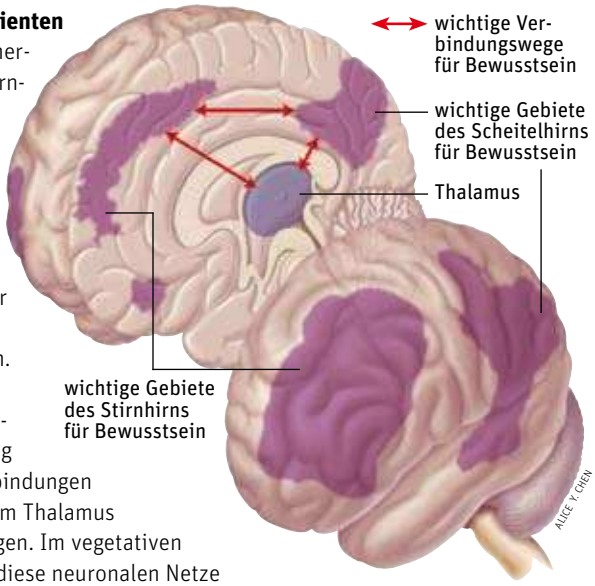
## Tennis im Kopf

Sehr aufschlussreich sind hierfür Studien aus dem Jahr 2006 an einer 23 Jahre alten Engländerin, die bei einem Verkehrsunfall schwere Kopfverletzungen an der Stirn erlitten hatte. Zunächst lag die junge Frau über eine Woche im Koma, dann fiel sie ins Wachkoma, also anscheinend in ein vegetatives Stadium. Das heißt, sie öffnete manchmal von selbst die Augen, reagierte aber niemals, wenn jemand sie ansprach oder in anderer Weise Reaktionen hervorlocken wollte.

Fünf Monate nach dem Unfall untersuchte ein Team um Adrian Owen von der Universität Cambridge zusammen mit Melanie Boly von unserer Arbeitsgruppe diese Patientin. Sie zeichneten funktionelle MRT-Bilder auf. In einer Versuchsreihe spielten sie der Patientin Tonbänder mit Alltagsgeräuschen und kleinen begleitenden Kommentaren vor, wie: »Er tut Milch und Zucker in den Kaffee«, während man hörte, was geschah. Das löste bei der Hirnverletzten neuronale Regungen in der oberen und mittleren Schläfenwindung aus. Diese Gebiete des Schläfenlappens beteiligen sich beim Verständnis von Wortbedeutungen und Sprache. Bei gesunden Kontrollpersonen reagierten die gleichen Gebiete. Trotzdem musste diese Aktivität nicht unbedingt bedeuten, dass die Patientin etwas Gesprochenes bewusst wahrnahm. Denn ähnliche Hirnaktivität kann auch bei Gesunden manchmal im Schlaf, ja selbst unter Narkose auftreten.

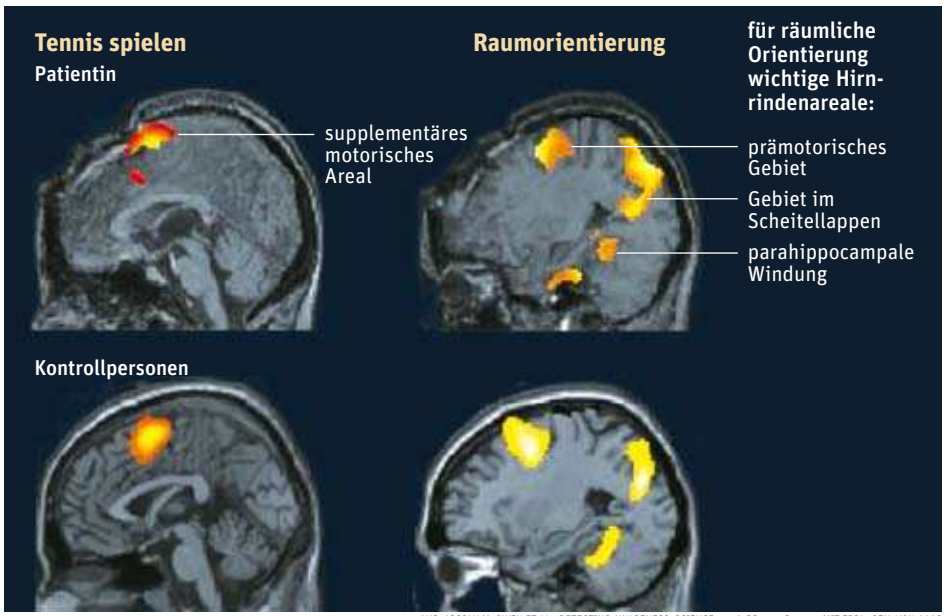
Darum machten die Forscher mit der Frau eine weitere Testreihe. Sie baten sie, sich bestimmte eigene Handlungen vorzustellen. Zum Beispiel sollte die Patientin im Geist ein Tennisspiel bestreiten. Und wirklich zeigten die Hirnbilder nun Aktivitäten im so genannten supplementären motorischen Kortex, ähnlich wie bei gesunden Menschen (siehe Kasten rechts oben, linke Bilder). Ein andermal sollte sich die Kranke vorstellen, sie ginge durch die

## Fehlende Kommunikation im Gehirn




**Bei Wachkomapatienten** fällt der geringe Energieverbrauch in Hirnrindenregionen auf, die bei auf Wahrnehmung bezogenen kognitiven Leistungen und wohl auch bei bewusster Wahrnehmung zusammenarbeiten. Diese Gebiete im Stirn- und Scheitelhirn sind hier farbig markiert, ihre Verbindungen zueinander und zum Thalamus als Pfeile eingetragen. Im vegetativen Zustand scheinen diese neuronalen Netze nicht zu arbeiten, entweder weil die entsprechenden Rindengebiete schadhaft oder weil die Nervenfasern dazwischen defekt sind.

## Versteckte Regungen




AUS: ADRIAN M. OWEN ET AL., DETECTING AWARENESS, SCIENCE 2006, BD. 313, S. 1402; MIT FRDL. GEN. VON AAAS

**Eine schwer hirnverletzte junge Frau** (obere Bilder) reagierte auf bestimmte ihr gestellte Aufgaben mit Hirnaktivität in den gleichen Gebieten wie gesunde Menschen (untere Bilder). Zum Beispiel sollte sie sich vorstellen, Tennis zu spielen (links) oder durch ihre Wohnung zu gehen (rechts). Bei der ersten Aufgabe sprachen motorische Areale an, bei der zweiten ein neuronales Netz für räumliche Orientierung. Vermutlich befand sich die Patientin in einer Übergangsphase vom vegetativen zum minimal bewussten Zustand.

Zimmer ihres Hauses. Jetzt regten sich Gebiete in der prämotorischen, parahippocampalen und parietalen Hirnrinde, die zum neuronalen Netz für räumliche Orientierung gehören. Auch diesmal wirkte die Erregung genauso wie bei einem unversehrten Gehirn (Kasten oben, rechte Bilder).

Obwohl die klinische Diagnose auf einen vegetativen Zustand hindeutete, verstand diese Frau offensichtlich Anweisungen und konnte sie wiederholt befolgen. Sie muss demnach bei Bewusstsein gewesen sein, so die Folgerung der Forscher. War etwa die klinische Diagnose falsch gewesen? Doch Ärzte untersuchten die Patientin auch im Verlauf der beschriebenen Tests mehrmals daraufhin und kamen stets zum gleichen Ergebnis: Sie sei in einem vegetativen Zustand. Allerdings registrierten die Ärzte auch, dass die Frau manchmal ganz kurz etwas mit dem Blick fixierte. Zwar kommt das im Wachkoma gelegentlich vor, gilt aber als untypisch. Man sollte dann unbedingt nach weiteren Anzeichen für ein Gewahrsein suchen.

Bei Folgeuntersuchungen ein halbes Jahr nach der geschilderten Studie konnte die Patientin Objekte mehr als fünf Sekunden lang fixieren. Hielt man ihr jetzt einen Spiegel vors Gesicht und bewegte ihn langsam, folgte sie mit den Augen ihrem Spiegelbild. Beides deutet auf den Übergang in einen minimal bewussten Zustand hin.

Dies alles bedeutet keineswegs, dass jeder Wachkomapatient, der sich angeblich in einem chronischen vegetativen Zustand befindet, ein Bewusstsein hat. Bei der englischen Patientin wussten wir von Anfang an, dass in Anbetracht ihrer Jugend, der Art des Hirnschadens und der noch nicht langen Dauer des Wachkomas eine Aussicht von 20 Prozent bestand, dass sie wieder zu Bewusstsein kommen könnte. An der Universität Liège haben wir über 60 Patienten im vegetativen Zustand mit funktionellen Hirnbildern auf Bewusstseinsanzeichen ähnlicher Art hin untersucht. Bei keinem einzigen konnten wir welche entdecken.

Die plausibelste Erklärung für diese Diskrepanz ist wohl, dass sich die junge Engländerin zur Zeit der Tests schon in einem Übergangszustand hin zu minimalem Bewusstsein befand. Nach einer neueren Arbeit einer Gruppe um Di Haibo von der Zhejiang-Universität in Hangzhou (China) kann eine mit funktioneller MRT messbare Aktivität in höheren Hirnregionen bedeuten, dass sich eine Verlagerung hin zu einem Minimalbewusstsein ankündigt.

Es dürfte deutlich geworden sein, wie schwierig und heikel es oft ist, den Bewusstseinszustand von Patienten zu beurteilen, die in einem Wachkoma zu liegen scheinen. Neue Verfahren für Hirnaufnahmen lieferten dazu zwar schon wichtige Erkenntnisse. Dennoch wartet noch viel Forschung auf uns, bis wir sicher feststellen können, ob sich ein Kranker wirklich in einem rein vegetativen Zustand befindet. Das berührt auch Prognosen und Therapiemaßnahmen. Bis dahin müssen sich die Ärzte bei einer Entscheidung über das weitere Vorgehen weiterhin auf die herkömmlichen klinischen Untersuchungen stützen. ◁

**Steven Laureys** leitet die Komaforschungsgruppe am Zyklotron-Forschungszentrum der Universität Liège (Belgien). Auch ist er klinischer Direktor der Neurologischen Abteilung am Universitätskrankenhaus Sart Tilman in Liège.

Hirntod und Wachkoma. Von Steven Laureys in: Spektrum der Wissenschaft 2/2006, S. 62 (übersetzt aus: Nature Reviews Neuroscience)

Detecting awareness in the vegetative state. Von A. M. Owen et al. in: Science, Bd. 313, S. 1402, 8. Sept. 2006

The boundaries of consciousness. Neurobiology and neuropathology. Von S. Laureys (Hg.). Elsevier, 2006

The vegetative state: Medical facts, ethical and legal dilemmas. Von B. Jennett. Cambridge University Press, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/940411.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

# Wie rational sind AFFEN?

**Affen verblüffen die Forscher immer wieder mit ihrer Umsicht. Dennoch bleibt zu fragen, ob sie rational – logisch im menschlichen Sinn – denken können.**

MICHAEL STEDEN / ISTOCKPHOTO

**Orang-Utans können vorausschauend handeln. Doch was steckt dahinter? Dürfen wir die Klugheit anderer Primaten und ihr Denken nach menschlichen Kriterien bewerten?**

Von Bernard Thierry

Denken, Verstand, Vernunft, Intelligenz, Bewusstsein – für die letztlich nicht fassbaren kognitiven Phänomene haben wir viele Wörter. Wohl ebenso viele wissenschaftliche Deutungsansätze mag es schon dazu gegeben haben, ob Tiere gleiche geistige Fähigkeiten besitzen wie der Mensch.

Man braucht gar nicht bis zu Descartes zurückzugehen, der Tiere für belebte Maschinen hielt. Vor weniger als hundert Jahren behaupteten kluge Köpfe, ohne Sprache gäbe es kein Denken. Auch dieser Standpunkt gilt heute dank einer Revolution in den Kognitionswissenschaften als obsolet. In den letzten Jahrzehnten trugen Tierforscher viele erstaunliche Beobachtungen zu den geistigen Leistungen unserer Mitgeschöpfe zusammen. Besonders bei den Primaten fanden sie reichlich Anzeichen für Geisteszustände, die Gedanken oder Vorstellungen beinhalten. Tiere, die so etwas hervorbringen, machen sich ein Bild von der Welt, das ist unbestreitbar.

Aber wie weit reicht ihr Verstand? Lassen sie sich bei Verhaltensentscheidungen von Vernunft leiten, von rationaler Überlegung? Heutige Forscher versuchen zu ergründen, was die Tier- und die Menschenaffen in dieser Hinsicht können. Die Frage ist, ob das Tier eine Aufgabe anders löst, als indem es schrittweise zum Ziel kommt. Kann sich ein Affe einen Plan zurechtlegen? Vermag er Wirkungen auf Ursachen zurückzuführen? Ist er dazu fähig, einem Artgenossen eine Absicht zu unterstellen?

Solche Themen berühren unmittelbar uns selbst, die Natur des Menschen, charakterisierte doch schon Aristoteles den Menschen im Unterschied zu dessen Mitgeschöpfen als »vernunftbegabtes Tier«, als »Vernunftwesen«. Gilt diese Abgrenzung noch? Im Folgenden schildere ich eine Reihe experimenteller Studien, die ergeben, dass einige nichtmenschliche Primaten tatsächlich im Stande sind, logisch zu denken, künftige eigene Bedürfnisse vorherzusehen und Intentionen anderer zu verstehen – allerdings in Grenzen.

Kann ein Affe über etwas nachdenken, das er nicht sieht? In Leipzig prüfen dies Forscher des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Zusammenarbeit mit dem Leipziger Zoo an Menschenaffen. Der Psychologe Josep Call etwa führt unter den Augen der Zoobesucher Experimente mit Schimpansen und Gorillas durch. Beispielsweise zeigt er einem Tier zwei undurchsichtige Behälter, von denen es einen auswählen darf. Das Tier weiß: Nur einer enthält einen Leckerbissen. Dann schüttelt der Forscher eines der beiden Gefäße. Sofern dabei ein Geräusch zu hören ist, wählt der Affe – richtig – dieses Gefäß. Bleibt alles still, kommt es zwar auch vor, dass er das geschüttelte Behältnis haben möchte. Doch meistens entscheidet er sich für das andere. Demnach können diese Menschenaffen aus fehlenden Indizien Schlüsse ziehen – schlussfolgerndes Denken durch Ausschluss.

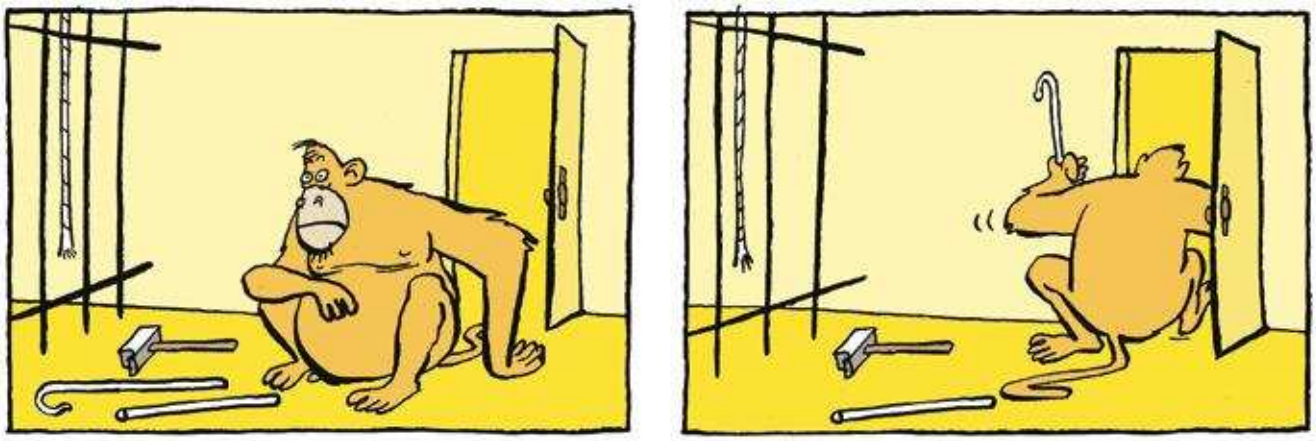
Wenn ein Tier eine Aufgabe löst, ist stets die Frage, ob ihm das durch Versuch und Irrtum gelang – auch indem es aus Fehlern lernte und sie korrigierte –, oder ob es vorher darüber nachgedacht, sich die Sache überlegt hat. Im ersten Fall würde das Tier lediglich zwischen Objekten oder Ereignissen Verbindungen bemerken, Muster, an denen es sein Verhalten ausrichtet. Es würde etwas ausprobieren und so dem Ziel in kleinen Schritten näherkommen. Im zweiten Fall hätte es Kategorien oder Eigenschaften erkannt und solche Abstrakta aufeinander bezogen. Es hätte sich eine Vorstellung gemacht und Schlussfolgerungen durchgeführt. Allgemeiner gesagt: Das

LIOR FILSHTEINER / FOTOLIA

## In Kürze

Inwieweit Affen rational handeln, vorausschauend denken oder sich in andere Tiere einfühlen, ist umstritten. Wahrscheinlich stellt ihre Intelligenz nicht einfach eine mindere Ausgabe der menschlichen dar, sondern sie entwickelte sich auf eigene Weise. Betrachtet man Verhaltensstrategien von Affen vor dem Hintergrund **evolutionärer Anpassungen**, leisten sie in manchem Erstaunliches. Logisch in unserem Sinn muss ihr Verstand dennoch nicht funktionieren.

**Von so einem nachdenklichen Blick lassen wir uns zu gern täuschen. Denn sogar Schimpansen verhalten sich in geschickt konzipierten Tests manchmal befremdend unverständig.**



**Orang-Utans können lernen vorauszuplanen – zum Beispiel ein Werkzeug an sich zu nehmen, das sie demnächst womöglich brauchen könnten.**

Tier bewertet eine Information als gültig, weil sie mit einer anderen verknüpft ist, von deren Wahrheitsgehalt oder Stimmigkeit es schon vorher überzeugt war.

Wie Affen damit umgehen, versuchen Forscher anhand künstlicher Situationen zu ergründen, in denen ein entscheidendes Element gerade nicht vorhanden ist, das zur Lösung der Situation aber benötigt würde. Mit solchen Versuchsaufbauten lässt sich erproben, ob ein Affe das Ausschlussverfahren anwendet, ob er sich die Position eines versteckten Gegenstands vorstellt oder auch, ob er die Transitivitätsregel benutzt (das Prinzip: Wenn B aus A folgt und C aus B, dann folgt C aus A).

## Kausalwirkung eines Messers

Weiterhin kann man mit raffinierten Tests prüfen, ob es Menschenaffen gelingt, vorausschauend zu handeln – aktuell nicht gegebene, erst in Zukunft eintretende Umstände zu berücksichtigen. Das Team von Call versuchte das mit Orang-Utans (siehe Bilder oben). Die Affen lernten zum Beispiel, sich mit Hilfe eines bestimmten Werkzeugs eine Belohnung zu verschaffen. So konnten sie mit einem Stock mit gekrümmtem Griff eine Flasche Saft angeln. Als sie später wieder in denselben Raum durften, gab es dort keinen Saft. Nur verschiedene Geräte lagen herum, darunter auch wieder ein solcher Stock. Kurz darauf wurde der Orang-Utan in einen anderen Raum gelockt. Als er nach einer Stunde in den Versuchsraum zurückkam, waren die Geräte verschwunden, dafür hing jetzt die Saftflasche unerreichbar an der Decke.

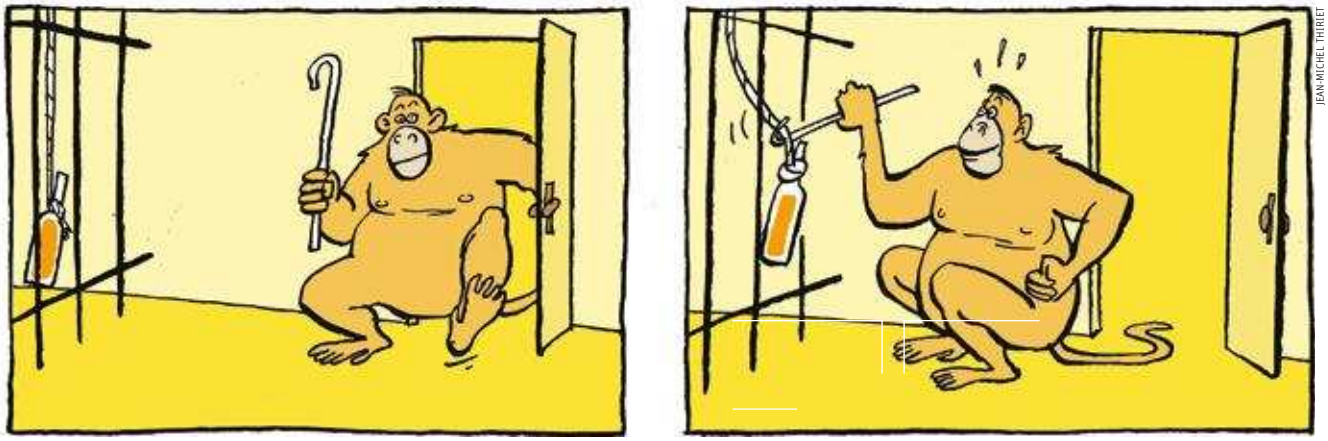
Würden die Affen beim nächsten Mal auf die Idee kommen, das passende Werkzeug mit aus dem Raum zu nehmen und nachher wieder mitzubringen? Wie sich zeigte, gelang es allen getesteten Tieren, sich mit dieser Situation zu arrangieren, also in die Zukunft zu planen. Einzelne der Orang-Utans bewältigten die Situation auch dann noch, wenn eine Nacht dazwischen lag. Offenbar vermochten sie sich in den nächsten – oder vergangenen – Tag hineinzuversetzen. Das hatten Forscher eigentlich nur dem Menschen zugetraut.

Wenn Menschenaffen – oder auch andere Affen – vorausschauend denken, müsste das zumindest bedeuten, dass sie Ereignisketten erfassen. Aber erkennen sie auch Ursache-Wirkungs-Beziehungen? Eine Forschergruppe um Marc Hauser von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) hat dies an den halb frei lebenden Rhesusaffen auf der kleinen Karibikinsel Cayo Santiago untersucht.

Die Frage war, ob diese Makaken die Kausalwirkung eines Werkzeugs begreifen, zum Beispiel die eines Messers. Also zeigte der Experimentator dem Affen erst einen Apfel und versteckte ihn dann hinter einer Abschirmung. Kurz darauf nahm er den Schirm weg – jetzt lagen da zwei Apfelhälften. Und schließlich ergriff er ein Messer, das auch hinter der Wand gelegen hatte, um es dem Versuchstier vorzuweisen.

Der Aufbau passte zur Reihenfolge eines möglichen Geschehens: Der Apfel könnte mit dem Messer geteilt worden sein. Doch in anderen Fällen demonstrierte der Experimentator Dinge, die in dieser Weise nicht vereinbar sind: etwa statt eines Messers ein Glas Wasser. Oder er zeigte zuerst zwei halbe Äpfel und im zweiten Schritt einen ganzen Apfel. Die Forscher maßen, wie lange der Affe die Situation betrachtete. Die Tiere guckten denn auch länger hin, wenn das Ganze nicht zueinanderpasste. Hauser deutet dies als Zeichen von Irritation – als rationale Reaktion auf die Diskrepanz zwischen Erwartung und Beobachtung.

Ähnliche Tests hatte der amerikanische Forscher David Premack Mitte der 1970er Jahre mit einem Schimpansen durchgeführt. Auch der zeigte sich von unlogischen Versuchsaufbauten offensichtlich irritiert. Bemerkenswert ist die Reaktion der Rhesusaffen aber vor allem deswegen, weil diese Primaten von sich aus normalerweise keine Werkzeuge benutzen, während Schimpansen das selbst im Freiland



JEAN-MICHEL THIRIET

tun. Zwar können die Makaken auf Cayo Santiago manchmal Menschen mit einem Messer hantieren sehen. Doch keiner von ihnen hat jemals selbst eines verwendet, genauso wenig wie irgendein anderes Werkzeug. Was bedeutet es, dass sie anscheinend erkennen, dass man mit diesem Gerät einen Apfel teilen kann? Inwieweit spricht das für ein Verständnis eines Kausalzusammenhangs?

Der schottische Philosoph David Hume (1711–1776) hielt es für sinnlos, nach einem letzten Beweis für Kausalität zu suchen. Unsere Wahrnehmung würde uns nur vermitteln, dass Ereignisse zusammentreffen. Unterstellt man eine Ursache, zieht man einen Schluss. Dabei entwirft man eine – richtige oder falsche – Hypothese über den Mechanismus, der die Ereignisse miteinander verknüpft. Mit diesem Kausalverständnis gewinnt man mehr Einfluss auf die Realität. Damit lassen sich schließlich unter den unzähligen möglichen Verknüpfungen selbst noch Zusammenhänge aufdecken, die räumlich oder zeitlich weit auseinanderliegen. Dies wäre ein starkes Kausalitätsverständnis.

## Ein Begriff von etwas grundsätzlich nicht Sichtbarem

Nun mag ein Rhesusaffe durchaus erfassen, dass ein Messer beim Zerlegen eines Apfels beteiligt sein kann. Selbst wenn er den Vorgang gar nicht beobachtet, könnte er das Ergebnis vorhersehen. Von einem schwachen Kausalitätsverständnis würde man sprechen, wenn er sich dabei vom Mechanismus des Zerlegens keine genaue Vorstellung macht. Trifft das vielleicht auf nichtmenschliche Primaten zu? Können sie Zusammenhänge nur vorhersehen oder sie auch erklären? Darüber streiten sich die Gelehrten noch.

Laut Call und Hauser spricht es für ein (starkes) Kausalitätsverständnis, wenn ein Affe versteht, was ein Geräusch bedeutet oder was ein Messer bewirkt. Dagegen deutet Daniel Povinelli von der Universität von Louisiana in Lafayette solche Beobachtungen kritisch (Spektrum der Wissenschaft, Spezial 3/1999, S. 71). Er hat mit Schimpansen eine Serie von Experimenten durchgeführt, in denen er deren Vorstellungen von physikalischen Gesetzmäßigkeiten überprüfte. Bei Aufgaben, die ein Verständnis beispielsweise von Schwere, Festigkeit oder Kraftübertragung verlangten, versagten die Affen. So unterschieden sie nicht, ob ein Objekt – etwa ein Rechen – ein funktionsfähiges Gerät darstellte, dessen Teile fest zusammenhingen, oder ob die Einzelteile nur lose beieinanderlagen (Kasten S. 55). Sie stießen sich auch nicht daran, wenn ein Apfel nicht auf einem Tuch lag, sondern dicht daneben, sodass er gerade die Kante berührte. Sie versuchten trotzdem, die Frucht mit dem Tuch zu sich zu ziehen – nicht anders als dann, wenn der Apfel darauf lag.

Povinelli zufolge handelt es sich um zwei völlig verschiedene gedankliche Ebenen, ob ein Affe sich etwas vorstellt, das er momentan wegen der äußeren Umstände nicht sieht – etwa die Flasche Saft im anderen Raum –, oder ob er sich von etwas grundsätzlich nicht Sichtbarem einen Begriff macht – wie, dass bei einem Gerät die Teile fest zusammenhaften müssen. Vermag das Tier an reale Dinge zu denken, die es gerade nicht vor Augen hat, bedeutet das noch lange nicht, dass es etwa physikalische Kräfte, also letztlich Kausalzusammenhänge begreift. Sich einen generellen Mechanismus vorzustellen, dazu ist mehr erforderlich als dafür, sich Sachen auszumalen, die augenblicklich nicht da sind.

Ähnlich schwer lässt sich mit Experimenten beantworten, ob Affen ihren Artgenossen Absichten und Wünsche, Gedanken und Vorstellungen zuschreiben. Genau das fragte Premack: Verwenden manche Tiere eine »Theorie« vom Verstand? Können sie das Verhalten anderer vorhersehen oder es sich erklären – indem sie anderen bestimmte Gedanken unterstellen?

Verhalten von Artgenossen zu antizipieren, gelingt vielen Tieraffen. Doch sie scheitern, wenn sie deren psychischen Zustand erfassen

### LEXIKON

**Menschenaffen:**
Zu den großen Menschenaffen gehören Schimpansen, Bonobos, Gorillas, Orang-Utans; zu den kleinen Menschenaffen die Gibbons – eine von deren vielen Arten ist der Siamang.

**Tieraffen:**
Alle Affen, die nicht zu den Menschenaffen gestellt werden; oft sind auch nur die Hundsaffen oder sogar nur die Meerkatzen gemeint. Zu den Hundsaffen zählen Makaken, Paviane, Languren, Mangaben.

## Angewandte Wetterkunde

**Monatelang beobachteten Forscher** der Universität St Andrews (Schottland) in Uganda, nach welchen Kriterien Mantelmangaben Früchte tragende Bäume aufsuchen. Zu den wichtigsten Futterquellen dieser Affen gehören Banjanfeigen.

Diese Bäume tragen Früchte nicht gleichzeitig. Darum können die Affen nicht von einer ergiebigen Stelle auf andere schließen. Ob die Früchte eines Baums schon reif sind, können sie von Weitem aber weder sehen noch riechen. Sie kontrollieren jedoch nicht etwa regelmäßig und planlos alle ihnen bekannten Feigenbäume. Vielmehr benutzen sie ihr Gedächtnis. Sie erinnern sich offenbar, welche Bäume bei der letzten Visite schon Früchte angesetzt hatten, denn solche Orte steuert ihr Trupp bevorzugt an, um sie genauer zu inspizieren – und das besonders eifrig, wenn eine Stelle damals viele von ihnen angelockt hatte. An beim letzten Mal leeren Bäumen zieht die Gruppe gewöhnlich in größerer Entfernung vorbei.

Doch die Mangaben beachten auch das Wetter: An und nach heißen, sonnigen Tagen kontrollieren sie Bäume mit vielen Früchten besonders gern. Auch besuchen sie solche Orte in längeren Phasen guten Wetters häufiger. Um zuvor leere Feigenbäume kümmern sie sich dann ebenso wenig wie um kürzlich leer gefressene. Nur wenn eine Futterquelle so reichhaltig war, dass viel übrig blieb, steuern sie diese wieder an, wenn sie in der Nähe vorbeikommen.

Übrigens pulen die Mangaben gern Käferlarven aus unreifen Feigen. Auch zu diesem Zweck müssen sie die Früchte inspizieren.

DUNCAN WRIGHT

müssten. Beispielsweise unterscheiden die Tiere nicht zwischen einem Individuum, das den Ort einer versteckten Belohnung kennt, und einem ahnungslosen Kumpan. Sie bringen es auch nicht fertig, eine Aufgabe gemeinsam zu lösen, wenn dazu nötig ist, die Ziele oder Wünsche von Gefährten zu begreifen. Sie richten sich offenbar allein nach den Handlungen von anderen, nicht aber danach, was diese denken mögen. Rhesus- und Kapuzineraffen begreifen, dass ein bestimmtes Geräusch einen Menschen erschreckt und auch, dass unser Blick auf eine wichtige Stelle weisen kann. Aber sie verstehen sich nicht darauf, sich unserem Blick zu entziehen, indem sie hinter einer Wand verschwinden. Offenbar können sie sich nicht danach richten, was ein anderer vielleicht denkt.

Für die großen Menschenaffen scheint das so nicht zu gelten. Am Leipziger Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie untersuchten Michael Tomasello, Josep Call und ihre Kollegen, wie gut Schimpansen Handlungsabsichten erkennen. In einem der Versuche tat ein Mensch so, als wollte er dem Tier einen Leckerbissen geben. Doch dann ließ er den entweder »versehentlich« fallen, oder er nahm ihn einfach wieder weg. Fiel das Obst auf den Boden, beobachtete der Schimpanse nur ruhig und aufmerksam, was geschah. Im anderen Fall wurde er unruhig, schlug zum Beispiel mit der Faust gegen das Gitter – und verzog sich in den Nebenraum. Sein Verhalten wirkte, als hätte er jeweils verstanden, ob der Mensch etwas mit Absicht tat oder nicht.

Bei einem anderen Test machten gleichzeitig zwei Schimpansen mit, die in einem klaren Rangverhältnis zueinander standen. Sie hockten zunächst in getrennten Käfigen an gegenüberliegenden Seiten eines Mittelraums und konnten jeder durch eine halboffene Tür zusehen, wie jemand in diesem Raum ein Futterstück hinter einer der darin aufgestellten Sichtbarrieren so versteckte, dass es nur der rangniedrige im Blick hatte. Die Affen konnten sich auch gegenseitig beobachten. Dann durfte der unterlegene Affe in den Raum. Doch er kümmerte sich um den Leckerbissen nicht – wenn der andere die ganze Zeit zugeschaut hatte. Hatte der überlegene aber den Vorgang des Versteckens nicht gesehen, weil seine Tür zu gewesen war oder weil er dem Raum den Rücken zugekehrt hatte, dann beeilte sich der unterlegene, die Frucht rasch hinter dem Sichtschutz zu fressen. Die Deutung: Der unterlegene Affe schien damit zu rechnen, dass der überlegene ihn beim nächsten Zusammentreffen bestrafen würde, wenn er den Leckerbissen wegnahm. Er konnte offenbar einkalkulieren, ob der andere überhaupt etwas von dem Futter wusste. Demnach scheinen Schimpansen zu erkennen, was andere wollen oder wissen.

Was passiert, wenn sie es gemeinsam mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten, also mit nicht sichtbaren Sachen, zu tun haben? Schimpansen gelingt Kooperation, etwa um einen schweren Gegenstand zu bewegen. Doch dabei sieht man sie sich nie über ihre Absichten austauschen. Hieraus folgt: Um ihre geistige Kapazität und deren Grenzen einzuordnen, dürfen wir es uns nicht zu einfach machen und eine simple Zweiteilung annehmen. Denn offenbar gibt es nicht entweder eine Deutung der Welt, die allein auf Beobachtung beruht – oder andererseits eine der unseren ähnliche, zu der auch Vorstellungen vom geistig-gedanklichen Leben gehören.

### Begrenztes Einfühlungsvermögen

Möglicherweise können die großen Menschenaffen anderen durchaus Absichten zuschreiben, ohne zugleich unser vielschichtiges psychologisches Verständnis zu besitzen. Vielleicht unterscheiden sie nicht wirklich so genau dazwischen, ob ein Tier etwas denkt, glaubt oder will. Falls das zuträfe, könnten sie

### EIN MODERNES FORSCHUNGSGEBIET

»Kognition« ist der Überbegriff, unter dem viele Forscher heute Phänomene wie Intelligenz oder Lernen fassen. Inzwischen benutzen auch die meisten Tierforscher das Schlagwort unter anderem für ökologische, soziale oder kulturelle Leistungen, die verstandesgeleitet sind.

nicht erfassen, dass die gleiche Handlung ganz verschiedene, auch mehrere Motivationen haben kann. Menschenkinder fangen im zweiten Lebensjahr an, mit dem Finger auf Dinge zu zeigen, und wollen damit die Aufmerksamkeit anderer erheischen. Dagegen verleihen Menschenaffen ihren Intentionen offenbar nicht gewollt Ausdruck. Von allein zeigen sie nie mit dem Finger. Laut Tomasello können vom Menschen aufgezogene Schimpansen das aber lernen – wie sie ja auch begreifen, Dinge mit Symbolen zu benennen. Doch sie benutzen das nur als Aufforderung, etwa wenn sie etwas haben wollen. Anderen einfach etwas mitzuteilen, eine Informationsabsicht, scheint ihnen nicht zu eigen zu sein. Diese Intention gehört aber zur menschlichen Sprache.

## Erkenntnis von Irrtümern

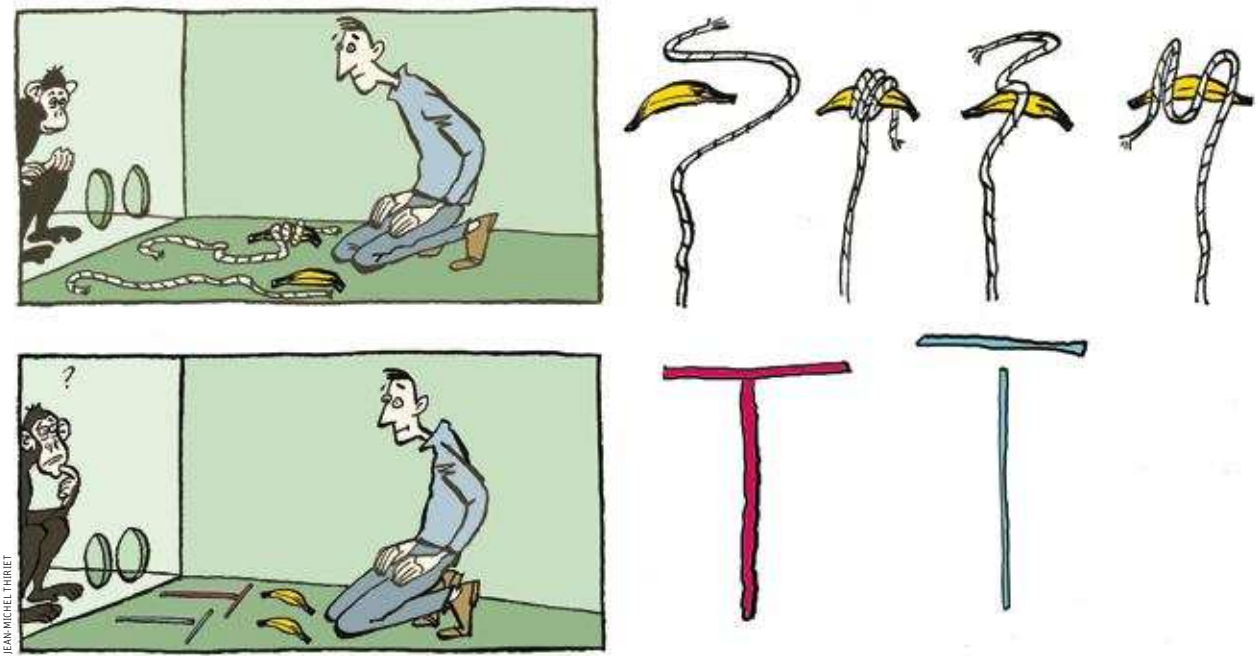
Demnach wäre es eine spezielle Eigentümlichkeit des Menschen, hinter Beobachtungen die nicht sichtbaren Gründe zu suchen. Genau solches Streben bildet auch den bevorzugten Tummelplatz von Wissenschaftlern. Eben deswegen müssen wir aufpassen, dass wir anderen Primaten nicht eine Vernunft unterstellen, die in Wahrheit unserer Einbildungskraft entspringt. Zum Beispiel wäre für die Rhesusaffen von Hausers Studie erst noch mit weiteren Arbeiten zu belegen, dass die Affen das Trinkglas deswegen länger anschauten als das Messer, weil sie verblüfft dachten, dass man mit einem Wasserglas doch keinen Apfel zerschneiden kann. Wir Menschen hätten wohl so überlegt – aber ein Rhesusaffe?

Bei diesen Fragen wird man letztlich nicht weiterkommen, indem man sich nur möglichst viele verschiedenartige Experimente dazu ausdenkt. Vernunft wird seit Hume verstanden als Fähigkeit, zur Erreichung eines Ziels die passenden Mittel zu wählen. Das setzt voraus, dass der Handelnde auch seine Irrtümer erkennt. Um nun herauszufinden, ob Tiere logisch denken, bringen wir sie allzu gern in Situationen, die sie veranlassen, die Umstände möglichst gut zu nutzen, das heißt für sich selbst möglichst viel dabei herauszuschlagen. Doch woher wollen wir wissen, ob sie sich nach Regeln der Logik richten, ob sie Widersprüche erkennen, ob sie ihre Annahmen überprüfen? Möchten wir die Verhaltensentscheidungen dieser Primaten deuten, dann bleibt uns gar nichts anderes, als von vornherein Rationalität vorauszusetzen, falls ihnen eine Lösung gelingt. Wir schreiben ihnen dann Absichten zu und geben doch nur unserer eigenen Denkungsart durch

**Tieren dürfen wir nicht vorschnell eine Vernunft unterstellen, die womöglich nur unserer eigenen Einbildungskraft entspringt**

## Nicht zum Physiker geboren

**Physikalische Gesetzmäßigkeiten** scheinen Schimpansen nicht wirklich zu begreifen. Um eine Banane zu erlangen, ziehen sie an dem Strick, egal ob der fest um die Frucht gewickelt ist oder sie nur lose berührt. Immerhin greifen sie nicht danach, wenn beides gar keinen räumlichen Kontakt hat (obere Bilder). Sie verstehen auch nicht wirklich, wie ein Rechen funktioniert. Selbst wenn man ihnen den Unterschied vorher zeigte, greifen sie ebenso gern zum kaputten Gerät (untere Bilder).



BERNARD THIERRY

**Zusammen finden Tonkeana-Makaken Futterverstecke, die nur einer der Gruppe kennt, nicht etwa, weil sie auf dessen Vorwissen zählen. Vielmehr ist die Nahrungssuche eine Gemeinschaftsaktion, bei der der entschiedenste Affe schließlich den Ton angibt.**

die Hintertür wieder Zutritt. So wertvoll unsere anthropozentrische Herangehensweise für Erkenntnisse oft ist – den Verstand von Tieren stufen wir hiermit doch nur als unvollständige Version des unsrigen ein.

Um solchen Anthropozentrismus zu vermeiden, kann man allerdings auch einen alternativen Weg wählen und nach der Evolution der Phänomene fragen. Denn vieles am Verhalten von Arten erklärt sich aus ihrer Entwicklungsgeschichte, insofern es sich auf das Überleben und dadurch letztlich – das ist das Entscheidende – auf den Fortpflanzungserfolg, die Fitness, der Tiere auswirkt. Aus dieser darwinistischen Perspektive fragen Forscher nach der Zweckmäßigkeit von Verhalten, und zwar ganz ähnlich wie Ökonomen Profitmaximierung untersuchen. Betrifft der anthropozentrische Ansatz unsichtbare psychische Entscheidungsmechanismen, so interessieren beim Evolutionsansatz deren beobachtbare Ergebnisse: Diese Wissenschaftler berechnen, wie gut sich jemand relativ zu anderen fortpflanzt. Als rational in diesem Sinn gelten Verhaltensentscheidungen, die einem Tier letztlich verhältnismäßig viele Nachkommen bringen.

Nehmen wir als Beispiel die Futtersuche von Früchte fressenden Affen. Früchte reifen im Lebensraum jener Primaten höchst unregelmäßig – an weit verteilten Orten und überdies schwer vorhersehbar zu ganz verschiedenen Zeiten. Nicht selten stellt ein Frucht tragender Baum weit und breit die einzige Nahrungsinsel dar. Ist sie nach kurzer Zeit leer gefressen, mögen andere Inseln auftauchen, die auch nicht lange Bestand haben. Manche dieser Bäume halten sich an Jahreszeiten, andere nicht. Unter solchen Bedingungen wäre es nicht sehr geschickt, würden die Affen zur Nahrungssuche planlos umherziehen. Doch es dauerte, bis Primatologen erkannten, dass diese Primaten nicht einfach stets die nächstgelegene Ressource plündern, die sie zufällig entdecken.

Vielmehr verwenden sie offenbar ausgefeilte Erkundungsstrategien. Sie haben vermutlich Wegenetze, Kreuzungen und Geländemerkmale im Kopf. Bei ihren Streifzügen dürften sie das Gebiet in Abschnitte unterteilen, die sie wahlweise absuchen oder passieren. Einige von den vielen Entscheidungen, die sie dabei offensichtlich treffen, nennen Elena Cunningham und Charles Janson von der New-York-Universität beziehungsweise der Staatsuniversität von New York in Stony Brook hinsichtlich einer neuen Primatenstudie in Südamerika. Demnach wägen Affen ab, ob sie besser zu einem reichhaltigen, aber fern gelegenen Ort ziehen oder sich mit einer nahen, kleineren Futterquelle begnügen; ob sich auf dem Weg zu einem guten Angebot ein Umweg zu einer Stelle lohnt, wo es nur ein paar Hand voll zu holen gibt; auf welcher Route die Tiere einer konkurrierenden Affengruppe am besten ausweichen können; ob sie sich besser allein auf den Weg machen oder sich anderen anschließen. Auch muss ein Affe wissen, wie er die anderen nach einer Trennung wiederfindet. Vor allem aber kommt es darauf an, ob sich der Weg überhaupt lohnt – ob der angestrebte Ort inzwischen wieder gutes, reifes Futter bietet.

Sind Tiere im Stande, dergleichen Aspekte einzukalkulieren, dann lohnen sich ihre Streifzüge mehr. So zeigten Freilandversuche, dass Japanmakaken aufmerksam werden, wenn sie irgendwo auf eine reife Frucht stoßen. Selbst wenn die Jahreszeit eigentlich nicht passt, suchen sie nun die entsprechenden Bäume oder Sträucher auf.

Forscher von der Universität St Andrews (Schottland) um Karline Janmaat beobachte-

ten in Uganda, nach welchem Prinzip Mantelmangaben – die gern Feigen fressen – Bäume voller Früchte finden (siehe Kasten S. 54). Offensichtlich müssen sie die reifen Feigen nicht erst sehen oder riechen. Vielmehr scheinen sie es sich gut zu merken, wenn ein Baum, an dem sie gerade vorbeikommen, viele Früchte angesetzt hat. Besonders erstaunte die Forscher, dass es die Affen von den Wetterbedingungen der letzten Zeit abhängig machen, ob sie zur Kontrolle wiederkommen. Es ist nicht anzunehmen, dass sie den Einfluss von Sonne und Wärme auf die Reifung von Früchten begreifen. Aber vielleicht haben sie gelernt, dass bei gutem Wetter bald wieder leckere Nahrung zu finden ist.

Nicht zwangsläufig sind Handlungen, die sich unter der natürlichen Selektion bewähren, auch logisch-rational. So mag es unvernünftig wirken, wenn Tiere beim geringsten Anlass die Flucht ergreifen, auch wenn weit und breit kein Räuber lauert. Doch Gefahren zu überschätzen ist immer noch besser als sie zu spät zu bemerken. Auch wir Menschen verhalten uns manchmal übervorsichtig und ausgesprochen risikoscheu – somit irrational. Zum Beispiel tendieren wir dazu, für Dinge in unserem Besitz einen höheren Preis zu fordern, als wir selbst für die gleiche Sache bezahlen würden. Evolutionär gesehen hat Risikovermeidung eben oft Vorrang.

## Das Verhalten der anderen

Doch auch wenn wir für unsere Fragestellung Rationalität so eingrenzen, dass wir uns mit Erscheinungen evolutionärer Anpassungen zufriedengeben, müssen wir aufpassen, nicht unsere eigenen Maßstäbe zu setzen. So zählt für jene Modelle weniger, dass Affen ihren Futterplan nach dem Wetter ausrichten. Von Belang ist vielmehr, dass sie möglichst viele Feigen mit möglichst wenig energetischem und Zeitaufwand zu ergattern verstehen, somit den Aufwand minimieren und den Ertrag optimieren – wie auch immer ihnen das gelingt. Denn um komplexe Probleme zu lösen, genügt es manchmal, einfache Regelmäßigkeiten zu nutzen. Schon die Annahme, infolge natürlicher Auslese würde die beste Lösung begünstigt und es gäbe gute und schlechte Entscheidungen, ist im Grunde ein Gebilde unseres eigenen Denkens. Wir tun so, als müssten wir und nicht das Tier entscheiden. Optimierung ist ein Ideal: Es stützt sich auf unser Wissen über die Lebenswelt des Individuums. Die Affen verfolgen oftmals nicht optimale Strategien, sondern solche, die ausreichen, um sich zu behaupten.

Somit ergibt auch der evolutionistische Ansatz für Affen nur eine begrenzte Rationalität. Verhaltensentscheidungen sind allein vor dem Hintergrund der gegebenen Umstände vernünftig. Das bedeutet auch: Intelligenz betrifft mehr als nur das, was im Gehirn stattfindet. Denn wichtig ist, was an Verhalten herauskommt, an Interaktionen mit der Umwelt. Eben dieses Prinzip befolgen Tonkeana-Makaken von der Insel Celebes.

BERNARD THIERRY

**Manchmal informieren sich Tonkeana-Makaken über gute Futterstellen, indem sie an der Schnauze eines Artgenossen riechen, der gerade etwas gefressen hat. Oft machen sie sich dann in die Richtung auf, aus der dieser gerade kam.**

Meine Forschungsgruppe beobachtet diese Affen in einem großen Freigehege des Primatenzentrums der Universität Straßburg, wo sie seit Langem leben (Bilder oben und links). Unter anderem versteckten wir Futter so, dass nur einzelne der Tiere dies bemerkten. Und obwohl die anderen davon nichts wussten, fanden alle zusammen das Versteck zügig. Dabei denken sie nicht etwa, dass einer von ihnen den Ort kennt. Aber sie verrechnen, wie wir erkannten, bei ihrer Gruppenentscheidung über die gemeinsame Marschrichtung das Verhalten aller Anwesenden. Jeder von ihnen drückt die von ihm bevorzugte Richtung durch Haltung, Blicke oder auch einige Schritte dahin aus. Am Ende folgen dann alle dem offenbar entschlossensten Affen, wobei es allerdings auch auf die einzelnen persönlichen Beziehungen, auf frühere Erfahrungen und auf Stimmungen ankommt. Bei der Entscheidung wirken also soziale wie kognitive Prozesse mit. Die Futtersuche wird so zu einer Gemeinschaftsleistung, auf die das Schlagwort einer »verteilten Intelligenz« ganz gut passt.

Vieles haben wir gerade in den letzten Jahren über den Verstand unserer Primatenvettern gelernt. Doch im Grunde haben wir in diesem Riesengebiet erst ein paar kleine Lichtungen geschlagen. Die verschlungenen Handlungen und Absichten von Affen werden wir uns wohl nur ganz langsam erschließen können. Da dürfte noch so manche Überraschung warten. ◁

**Bernard Thierry** ist Forschungsdirektor am französischen Nationalen Zentrum für wissenschaftliche Forschung (CNRS) in Straßburg. Er arbeitet am Primatenzentrum der dortigen Universität Louis Pasteur.

Einfühlungsvermögen bei Menschenaffen? Von Daniel J. Povinelli in: Intelligenz, Spektrum der Wissenschaft, Spezial 3/1999

Rational animals? Von S. Hurley und M. Nudds. Oxford University Press, 2007

A socioecological perspective on primate cognition. Sonderband von: Animal Cognition, Bd. 10, Heft 3, 2007

Comparative Cognition. Von E. Wasserman und T. Zentall. Oxford University Press, 2006.

Animal logics. Sonderband von: Animal Cognition, Bd. 9, Heft 4, 2006

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/940418.

# Amerikas Weg ins solare Zeitalter

**Drei Forscher stellen ihren »Solar Grand Plan« vor: Mit Hilfe von Sonnenenergie könnten die Vereinigten Staaten bis 2050 unabhängig von Ölimporten werden. Gleichzeitig würde landesweit die Emission von Treibhausgasen drastisch reduziert.**

Von Ken Zweibel, James Mason und Vasilis Fthenakis

Die hohen Preise für Benzin und Heizöl werden uns erhalten bleiben. Die USA sind in kriegerische Aktivitäten im Nahen Osten verwickelt, unter anderem auch, um ihre Ölinteressen in dieser Region zu schützen. Und da die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen etwa in China und Indien rasch anwächst, drohen auch künftig Auseinandersetzungen um den Zugang zu Energieressourcen. Unterdessen emittieren Kohle-, Öl- und Gaskraftwerke sowie Kraftfahrzeuge in aller Welt auch weiterhin Millionen Tonnen Treibhausgase jährlich und gefährden dadurch das globale Klima.

Längst haben Wissenschaftler, Ingenieure, Ökonomen und Politiker Vorschläge gemacht, wie sich der Verbrauch an fossilen Brennstoffen schrittweise reduzieren ließe. Diese reichen jedoch nicht aus. Insbesondere die USA benötigen ein umfassendes Konzept, um ihrer Abhängigkeit von fossilen Energien zu entkommen. Unsere Analysen zeigen, dass ein breit angelegter Umstieg auf Solarenergie die logische Antwort auf diese Herausforderung ist.

Solarenergie bietet ein immenses Potenzial: Durch Sonnenstrahlen gelangt binnen 40 Minuten so viel Energie auf unseren Planeten, wie wir derzeit weltweit während eines ganzen Jahres verbrauchen. Die USA befinden sich in der glücklichen Lage, allein in ihrem Südwesten über mindestens 650 000 Quadratkilometer geeigneter Fläche für die Aufstellung von

SCHOTT AG

Solarkraftwerken zu verfügen. Dieses Gebiet erhält jährlich etwa 5000 Exajoule Sonnenenergie (1 EJ = $10^{18}$ Joule), das entspricht rund 1,3 Millionen Terawattstunden. (Um eine entsprechende Energiemenge zu liefern, müssten alle Kernkraftwerke der Welt mit ihren derzeit über 400 Gigawatt Leistung fast 500 Jahre lang Strom erzeugen.) Gelänge es, nur 2,5 Prozent davon in elektrische Energie umzuwandeln, ließe sich der gesamte Energiebedarf der USA im Jahr 2006 mühelos decken.

Dafür müssten große Landflächen mit Solarmodulen und thermischen Parabolrinnenanlagen überdeckt werden. Darüber hinaus müsste eine Haupttrasse für den Transport von Gleichstrom errichtet werden, um diesen effektiv im Land zu verteilen. Die nötige Technologie ist bereits anwendungsreif.

Hier stellen wir unseren »Solar Grand Plan« vor, ein Konzept, mit dem sich im Jahr 2050 rund 70 Prozent des Strombedarfs und 35 Prozent des Gesamtenergiebedarfs einschließlich Transport- und Verkehrswesen der USA aus Solarenergie erzeugen ließe. Diese Energie könnte Endkunden zu (nicht subventionierten) Tarifen angeboten werden, die etwa denen entsprechen, die wir heute für Energie aus konventionellen Quellen bezahlen – rund 5 US-Cent pro Kilowattstunde (kWh). Nutzen wir auch Wind, Biomasse und geothermale Energiequellen, könnten erneuerbare Energien im Jahr 2100 sogar 100 Prozent des US-amerikanischen Strombedarfs und 90 Prozent des Gesamtenergiebedarfs abdecken.

## Die hohen Kosten zahlen sich aus

Um unser Konzept bis zum Jahr 2050 zu realisieren, müsste die Regierung in den kommenden 40 Jahren 420 Milliarden US-Dollar (derzeit rund 280 Milliarden Euro) investieren. Die hohen Kosten werden sich aber auszahlen. Solarkraftwerke benötigen wenig oder keinen Kraftstoff, sodass Jahr für Jahr Milliarden eingespart werden. Die neue Infrastruktur könnte 300 große Kohle- und 300 noch größere Gaskraftwerke ersetzen, auch der von diesen Kraftwerken verbrauchte Brennstoff würde eingespart. Der Bedarf an Ölimporten würde auf null zurückgefahren. Gleichzeitig ließe sich das US-Handelsdefizit drastisch reduzieren, und die politischen Spannungen im Nahen Osten und anderswo würden gemildert.

Da die Gewinnung von Solarenergie fast ohne Schadstoffemissionen auskommt, würde der Ausstoß an Treibhausgasen der US-Kraftwerke um jährlich 1,7 Milliarden Tonnen verringert. Weitere 1,9 Milliarden Tonnen, wie sie derzeit Kraftfahrzeuge in die Atmosphäre blasen, ließen sich durch Verwendung von Plug-in-Hybridfahrzeugen einsparen. (Die Batterien von Plug-in-Hybriden können nicht nur vom Verbrennungsmotor geladen werden, sondern auch an der Steckdose.) Dadurch würden die $CO_2$-Emissionen der USA im Jahr 2050 um mehr als 60 Prozent unter denen des Jahres 2006 zu liegen kommen.

In den letzten Jahren fielen die Herstellungskosten für Solarzellen und -module deutlich. Die günstigsten der heutigen Solarzelltypen sind Dünnschichtzellen aus Kadmium-Tellurid (CdTe). Um Strom im Jahr 2020 für 5 Cent pro kWh bereitstellen zu können, müssten CdTe-Module die Sonnenenergie mit einem Wirkungsgrad von 14 Prozent umwandeln. Die Kosten für entsprechende Anlagen dürften 1,20 Dollar pro Watt Leistung betragen. Derzeitige Module wandeln 10 Prozent der Sonnenenergie um und kosten rund 4 Dollar pro Watt.

## In Kürze

- Würden heutige Kohle-, Öl-, Gas- und Kernkraftwerke in den USA in großem Maßstab durch **Solarkraftwerke** ersetzt, könnten diese bis zum Jahr 2050 **rund 70 Prozent der in den Vereinigten Staaten benötigten Elektrizität** und 35 Prozent der gesamten dort benötigten Energie erzeugen.
- Dazu müssten **im Südwesten der USA weite Flächen mit Solarzellen** bedeckt werden. Überschüssige Elektrizität, die während des Tages erzeugt wird, würde in Form von komprimierter Luft in unterirdischen Kavernen gespeichert. Für den abendlichen und nächtlichen Energiebedarf wird sie dann wieder abgezapft. Auch große Parabolrinnenkraftwerke würden gebaut werden.
- Neue **Trassen für die Übertragung von Gleichstrom** sollen die Elektrizität über das ganze Land verteilen.
- Für diesen Plan werden zwischen 2011 und 2050 rund **420 Milliarden Dollar an staatlichen Subventionen** benötigt, damit die solare Infrastruktur etabliert und konkurrenzfähig gemacht werden kann.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

## Heutige Energieversorgung in Zahlen

| | |
|---|---|
| gesamte Primärenergieversorgung weltweit | 478,7 Exajoule[1] |
| gesamte Primärenergieversorgung USA | 98,0 Exajoule[1] |
| gesamte Primärenergieversorgung Deutschland | 14,4 Exajoule[1] |
| Stromverbrauch weltweit | 16 695 TWh[1] |
| Stromverbrauch USA | 4047 TWh[1] |
| Stromverbrauch Deutschland | 586 TWh[1] |
| Kraftwerkskapazität USA (Elektrizität) | 957 GW[2] |
| Kraftwerkskapazität Deutschland (Elektrizität) | 119 GW[3] |
| Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch USA | 9,5 Prozent (2006)[2] |
| Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch Deutschland | 14,3 Prozent (2007)[4] |

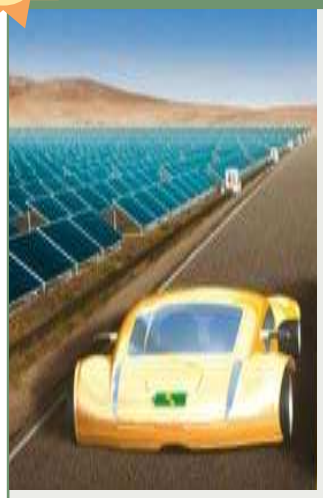
Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit beziehen sich alle Daten auf das Jahr 2005 (Ausnahmen sind gekennzeichnet). Sie sind nicht unbedingt identisch mit der Datenbasis der Autoren des nebenstehenden Artikels (Quellen: [1] IEA; [2] EIA; [3] BDEW/VDEW; [4] BEE)

Weitere Fortschritte sind also nötig. Doch im vergangenen Jahr stieg der durchschnittliche Wirkungsgrad kommerzieller Module von 9 auf 10 Prozent. Auch Fotovoltaikanlagen auf Dächern, die tagsüber einen Teil des häuslichen Stromverbrauchs abdecken, werden im Zuge dieser Entwicklung wettbewerbsfähiger werden.

Im Jahr 2050, so sieht unser Konzept vor, sollen Fotovoltaikmodule insgesamt 3000 Gigawatt Leistung erzeugen. Dazu müssten Module mit einer Gesamtfläche von rund 80 000 Quadratkilometern installiert werden. Dieses Vorhaben mutet gigantisch an. Bereits existierende Anlagen deuten aber darauf hin, dass im amerikanischen Südwesten die für die Erzeugung einer Gigawattstunde benötigte Landfläche kleiner ist als jene, die durchschnittlich von Kohlekraftwerken benötigt wird, wenn man auch das für den Kohleabbau verwendete Land in Rechnung stellt. Untersuchungen des Nationalen Labors für erneuerbare Energien (NREL) in Golden (US-Bundesstaat Colorado) zeigen, dass im Südwesten der USA mehr als genug Land zur Verfügung steht, ohne dass man auf ökologisch empfindliche Regionen, dicht besiedelte Gebiete oder auf schwer zugängliches Terrain zurückgreifen müsste. Jack Lavelle, Sprecher der Wasserschutzbehörde in Arizona, merkte dazu an, dass sich über 80 Prozent des Bundesstaats nicht in Privateigentum befinden und Arizona sehr daran interessiert sei, sein solares Potenzial zu entwickeln.

Die wichtigste anstehende Aufgabe ist daher, den Wirkungsgrad von Solarmodulen auf 14 Prozent zu erhöhen. Zwar wird die Effizienz kommerziell erhältlicher Zellen nie die von Laborprodukten erreichen. Doch die

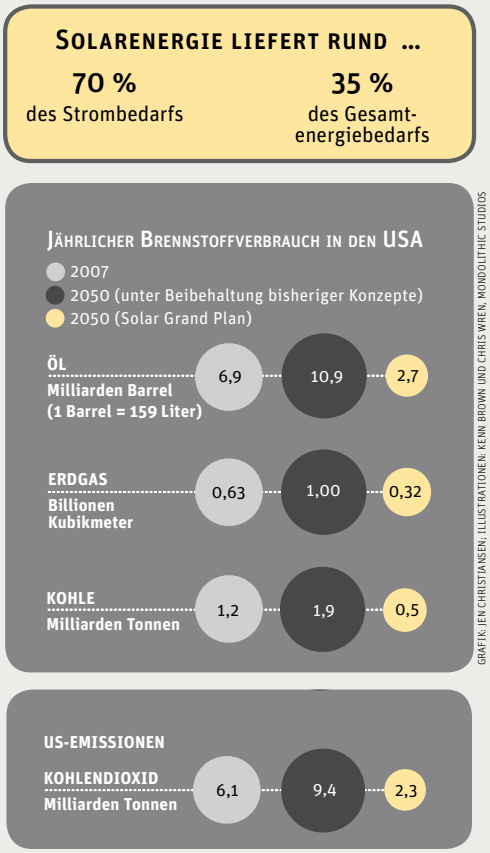
## Die US-Energieversorgung im Jahr 2050



**Bis 2050 könnten sich die USA von der Notwendigkeit von Ölimporten befreien.** Strom würde auf riesigen Fotovoltaikfarmen im Südwesten des Landes erzeugt. Energie, die nicht sofort verbraucht wird, würde in unterirdischen Hohlräumen gespeichert. Große Solarfarmen, die mittels konzentriertem Sonnenlicht Wasser erhitzen, generieren ebenfalls Strom.

Ein neues Gleichspannungsnetz liefert den erzeugten Strom in alle Bundesstaaten. Die erforderliche Technologie, kritische Faktoren für ihren Erfolg sowie die noch benötigten Fortschritte sind in der Grafik rechts dargestellt. Außerdem ist gezeigt, welche Leistung die unterschiedlichen neuen Kraftwerkstypen im Jahr 2050 werden liefern müssen. Die Umsetzung des Solar Grand Plan würde den Verbrauch an fossilen Brennstoffen in USA deutlich reduzieren, ebenso die Emission von Treibhausgasen (unten).

Bei unseren Berechnungen gingen wir von einer jährlichen Nettoverbrauchssteigerung in Höhe von einem Prozent aus; zudem rechneten wir mit einer hohen Umstellungsrate auf Hybridfahrzeuge. Wir berücksichtigten nur mögliche Verbesserungen in der Solartechnologie, die wir bis zum Jahr 2020 erwarten. Anschließende Effizienzsteigerungen würden unser Szenario daher positiv beeinflussen. **K. Z., J. M. und V. F.**




GRAFIK: JEN CHRISTIANSEN; ILLUSTRATIONEN: KENN BROWN UND CHRIS WREN, MONDOLITHIC STUDIOS

CdTe-Zellen des NREL erreichen bereits 16,5 Prozent und sollen noch besser werden. Und mindestens ein kommerzieller Hersteller, nämlich First Solar in Perrysburg (Ohio), erhöhte den Wirkungsgrad seiner CdTe-Module in den Jahren 2005 bis 2007 von 6 auf 10 Prozent und will bis 2010 11,5 Prozent erreichen.

Bei bewölktem Himmel erzeugen Solarkraftwerke natürlich nur wenig und nachts überhaupt keine Elektrizität. Daher muss in sonnenreichen Stunden zusätzliche Energie als Abend- und Nachtreserve gespeichert werden. Die meisten Energiespeichersysteme wie etwa Batterien sind jedoch teuer oder wenig effizient. Als sehr gute Alternative hat sich die Speicherung von Energie in Form von komprimierter Luft bewährt. Dabei wird Luft mit Hilfe von Solarstrom in unterirdische Kavernen, verlassene Minen, Aquifere (poröse Gesteine, die Grundwasser leiten) oder erschöpfte natürliche Gaslager gepresst.

Bei Bedarf wird die Luft wieder abgelassen und durch eine Strom erzeugende Turbine geleitet. Zuvor wird sie durch das Verbrennen kleinerer Mengen von Gas noch erhitzt. Bereits seit 1978 wird ein Druckluftspeicherkraftwerk erfolgreich im niedersächsischen Huntorf betrieben, und in McIntosh (Alabama) ging 1991 ein weiteres Werk ans Netz. Ihre Turbinen verbrauchen nur 40 Prozent der Gasmenge, die sie bei reinem Gasbetrieb benötigen würden. Zusätzliche Technologie zur Wärmerückgewinnung könnte diesen Wert auf 30 Prozent senken.

## Ein Netz von Druckluftspeichern

Untersuchungen des Electric Power Research Institute (EPRI) in Palo Alto (Kalifornien) ergaben, dass die Kosten für Druckluftspeicherung etwa halb so hoch sind wie die entsprechenden Kosten für Bleiakkumulatoren. Den Studien zufolge würden sich die Kosten für Fotovoltaikstrom durch die Speicherung um 3 bis 4 Cent pro kWh erhöhen, die Gesamtkosten im Jahr 2020 lägen also bei 8 bis 9 Cent pro kWh. Über Gleichstrom-Hochspannungsleitungen würde die von den Solarfarmen im Südwesten erzeugte Elektrizität zu Druckluftenergiespeichern im ganzen Land weitergeleitet. Dort installierte Turbinen könnten dann ganzjährig unterbrechungsfrei Strom erzeugen. Entscheidend sind die Standorte. Feldstudien der US-Gasindustrie und des EPRI ergaben, dass in drei Vierteln des Lan-

| Technologie | Kritischer Einflussfaktor | 2007 | 2050 | Erforderliche Massnahmen und Technologien |
|---|---|---|---|---|
| Fotovoltaik | Landfläche | 26 km² | 80 000 km² | Genehmigungen zur baulichen Entwicklung großer staatlicher Gebiete |
| | Wirkungsgrad von Dünnschichtmodulen | 10 % | 14 % | transparentere Materialien zur Verbesserung des Wirkungsgrads; Module mit höherer Spannung; größere Module, um inaktive Flächen zu verringern |
| | Installationskosten | 4 $/W | 1,20 $/W | Verbesserung des Wirkungsgrads; Preisvorteile durch Massenfertigung |
| | Strompreis | 16 US-Cent/kWh | 5 US-Cent/kWh | keine; Reduzierung ergibt sich aus niedrigeren Installationskosten |
| | Gesamtkapazität | 0,5 GW | 2940 GW | nationales solares Energieversorgungskonzept |
| Druckluftenergie-speicherung (mit Energie aus Fotovoltaikstrom) | Volumen | 0 | 15 Mrd. m³ | Anlagenentwicklung ist mit Erdgasindustrie zu koordinieren |
| | Installationskosten | 5,80 $/W | 3,90 $/W | Preisvorteile durch Massenfertigung; billigerer Fotovoltaikstrom |
| | Strompreis | 20 US-Cent/kWh | 9 US-Cent/kWh | keine; Reduzierung ergibt sich aus niedrigeren Installationskosten |
| | Gesamtkapazität | 0,1 GW | 558 GW* | nationales solares Energieversorgungskonzept |
| Parabolrinnen-kraftwerke | Landfläche | 26 km² | 41 000 km² | Genehmigungen zur baulichen Entwicklung großer staatlicher Gebiete |
| | Wirkungsgrad | 13 % | 17 % | Wärme tragende Flüssigkeiten, die Hitze effektiver transportieren |
| | Installationskosten | 5,30 $/W | 3,70 $/W | effizientere thermische Speichersysteme; Preisvorteile durch Massenfertigung |
| | Strompreis | 18 US-Cent/kWh | 9 US-Cent/kWh | keine; Reduzierung ergibt sich aus niedrigeren Installationskosten |
| | Gesamtkapazität | 0,5 GW | 558 GW* | nationales solares Energieversorgungskonzept |
| Gleichstromnetz | Länge | 800 km | 150 000 bis 800 000 km | neues HVDC-Netz, das den Südwesten der USA mit dem gesamten Land verbindet |

* Die tatsächliche Leistung ist sehr variabel. Die Leistungsdaten wurden daher »normalisiert«, sind jetzt also direkt mit denen konventioneller Kraftwerke vergleichbar.

## Fotovoltaik

TUCSON ELECTRIC POWER COMPANY

**Der Plan der Autoren sieht vor,** dass bis 2050 riesige Fotovoltaikfarmen auf rund 80 000 Quadratkilometer anderweitig nicht nutzbarem Ödland im Südwesten der USA errichtet werden. Sie würden ähnlich aussehen wie die 4,6-Megawatt-Anlage der Tucson Electric Power Company im US-Bundesstaat Arizona, die im Jahr 2000 den Betrieb aufnahm (Bild links). Hier sind einzelne Solarzellen zu Modulen zusammengeschaltet, die wiederum in Feldern gruppiert sind. Gleichstrom aus den Feldern fließt in Stromrichter und wird dann in Hochspannungsleitungen des Stromnetzes eingespeist. In einer Dünnschichtzelle (rundes Bild) setzen eintreffende Photonen Elektronen in der Kadmium-Tellurid-Schicht frei. Von dort bewegen sie sich in die obere leitfähige Schicht, um schließlich als nutzbarer Strom in die Schicht aus Metall auf der Rückseite zu fließen.

### Vorteile

- Abhängigkeit von ausländischem Öl sinkt von 60 auf 0 Prozent
- Globale politische Spannungen werden abgemildert, Kosten für Militäreinsätze sinken
- Das hohe US-Handelsdefizit sinkt stark
- Die Emission von Treibhausgasen sinkt stark
- In den USA werden neue Arbeitsplätze geschaffen

des geeignete geologische Formationen vorhanden sind, oft nahe an Ballungsgebieten. Äußerlich ähnelten die Druckluftspeichersysteme den Verteilstationen für Gas, wie sie in den USA üblich sind. Gas wird hier in 400 unterirdischen Reservoirs mit einem Gesamtvolumen von rund 230 Milliarden Kubikmetern gelagert. Unser Projekt würde bis 2050 ein Volumen von nur 15 Milliarden Kubikmetern erfordern, wenn man die Luft auf einen Druck von 7500 Kilopascal (75 Bar) bringt. Die Entwicklung solcher Anlagen ist zwar eine Herausforderung, aber es gibt zahlreiche verfügbare Reservoirs und genügend Gründe für die Gasindustrie, um in den Aufbau eines Druckluftspeichernetzes zu investieren.

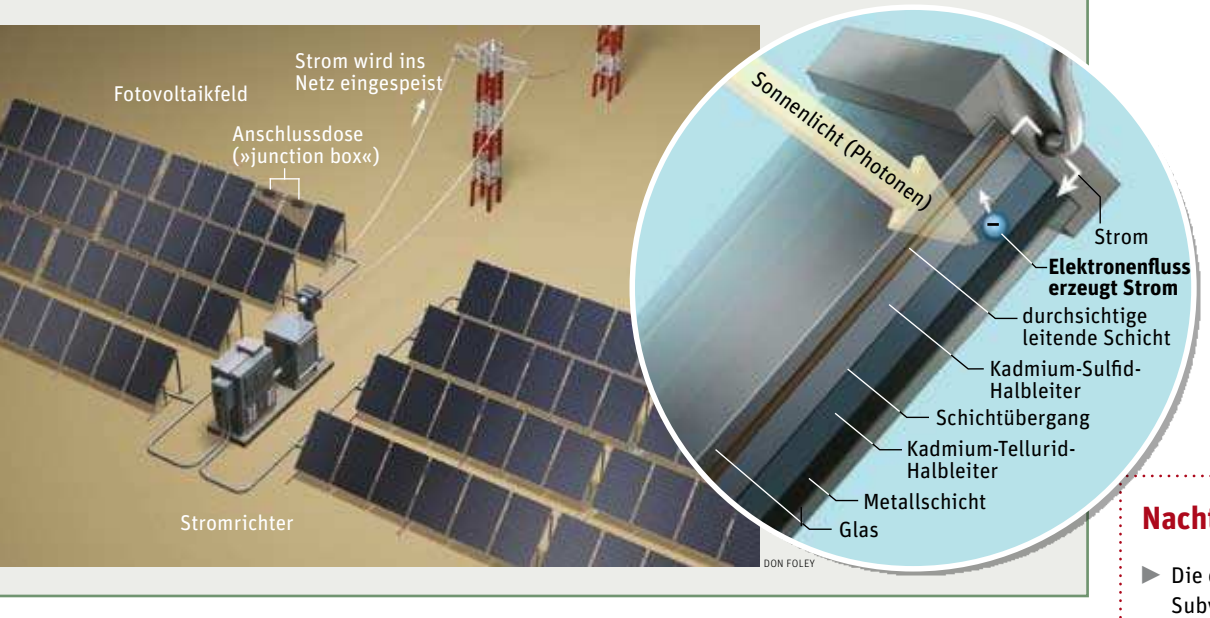
Unser Konzept setzt auch auf eine weitere Technologie: Parabolrinnenkraftwerke könnten ein weiteres Fünftel der benötigten Solarenergie liefern. In solchen Anlagen wird Sonnenlicht von langen Metallreflektoren auf ein mit Wärme tragender Flüssigkeit gefülltes Rohr fokussiert. Dabei wird die Flüssigkeit erhitzt und strömt anschließend durch einen Wärmetauscher, in dem Dampf zum Antrieb von Turbinen entsteht. Um die Energie zu speichern, kann die Flüssigkeit auch durch große isolierte Tanks geleitet werden, wo geschmolzenes Salz die Wärme aufnimmt und mindestens einige Stunden speichert. Nachts wird die Energie dann wieder abgezapft und zur Dampferzeugung genutzt.

Bereits seit vielen Jahren erzeugen neun Parabolrinnenkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 354 MW verlässlich Strom. Im März 2007 ging in Nevada auch ein neues 64-MW-Kraftwerk ans Netz. Einen Wärmespeicher besitzen diese Anlagen allerdings nicht. Das erste kommerzielle Kraftwerk mit Salzspeicher – er kann die 50-MW-Anlage sieben Stunden lang mit Betriebswärme versorgen – wird zurzeit in Spanien errichtet; weitere entstehen in aller Welt. Für unser Projekt hingegen werden 16 Stunden Speicherkapazität benötigt, damit rund um die Uhr Strom erzeugt werden kann.

### Massenproduktion senkt Preise

Parabolrinnenkraftwerke funktionieren also, doch die Kosten müssen noch gesenkt werden, unter anderem durch die Produktion größerer Stückzahlen. Ein Team von Solarenergiespezialisten der Western Governors' Association, einer Organisation, in der sich die Gouverneure von 19 westlichen US-Bundesstaaten unter anderem zum Zweck des Umweltschutzes zusammengeschlossen haben, kam zu dem Ergebnis, dass Parabolrinnenkraftwerke bis 2015 Strom für 10 Cent pro kWh (oder weniger) erzeugen könnten, wenn Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von 4 GW (Gigawatt, Milliarden Watt) errichtet würden.

Gelänge es, die Hitzebeständigkeit der Wärme tragenden Flüssigkeiten zu erhöhen, ließe sich die Effizienz noch steigern. Bislang lassen sie sich nur auf etwa 400 Grad Celsius erhitzen, ohne dass sie sich zersetzen – in den Parabolrinnen könnten aber weit höhere Temperaturen erzeugt werden. Ingenieure untersuchen zudem, ob auch das geschmolzene Salz selbst als Medium der Wärmeübertragung dienen könnte. So ließen sich Wärmeverluste ebenso wie Anlagenkosten reduzieren. Für das korrosionsfördernde Salz müssten jedoch auch



DON FOLEY

widerstandsfähigere Rohrleitungssysteme entwickelt werden.

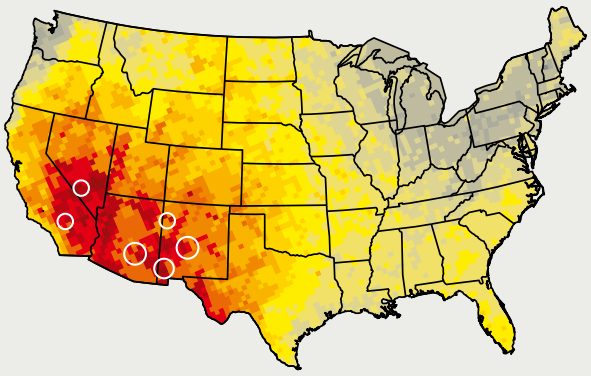
Weder Parabolrinnen- noch Solarzellentechnik sind derzeit voll entwickelt, gemäß unserem Plan sollten sie also noch bis 2020 Zeit zur Reifung erhalten, um dann in großem Umfang eingesetzt zu werden. Bis dahin könnten aber auch andere solare Technologien zur Verfügung stehen, die den ökonomischen Rahmenbedingungen genügen. Ohnehin werden sich Vor- und Nachteile der jeweiligen Ansätze allmählich immer besser abschätzen lassen, auch Investoren werden die Entwicklung beeinflussen.

Die geografische Struktur eines solaren Energieversorgungssystems wird sich vom bestehenden System deutlich unterscheiden. Während Kohle-, Öl-, Gas- und Kernkraftwerke überall in den USA relativ nahe an den Verbrauchszentren errichtet sind, stünden die meisten Solaranlagen im Südwesten. Das bestehende Wechselspannungsnetz ist allerdings nicht leistungsfähig genug, um den Strom von dort zu Endkunden im ganzen Land zu transportieren. Zudem käme es auf langen Strecken zu großen Verlusten. Das Oak Ridge National Laboratory im Bundesstaat Tennessee fand aber bei Tests heraus, dass in Hochspan-

## Nachteile

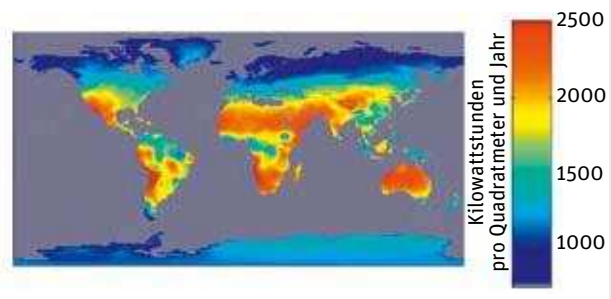
- Die erforderlichen Subventionen bis 2050 betragen 420 Milliarden Dollar
- Der politische Wille ist erforderlich, um die Finanzmittel aufzubringen (Steuer auf Strom aus fossilen Energieträgern?)
- Ein neues Hochspannungsnetz für Gleichspannungen muss von privaten Unternehmen errichtet werden

## Reiche Ressourcen in den USA



NACH: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (WWW.NREL.GOV)

**Insbesondere der Südwesten der USA** erhält reichlich Sonnenlicht. 120 000 Quadratkilometer müssten hier mit Fotovoltaikmodulen und Parabolrinnen bedeckt werden, um den Solar Grand Plan bis 2050 zu verwirklichen. Dies kann in unterschiedlichen Gebieten geschehen. Eine Möglichkeit ist hier maßstabsgetreu dargestellt (links). Die Weltkarte (unten) zeigt jährliche Einstrahlungsdaten (zehnjähriger Mittelwert von 1983 bis 1992).



GREGOR CZISCH, IEE-RE, UNIVERSITÄT KASSEL

## Solarstrom zwischen Nordkap und Tschad

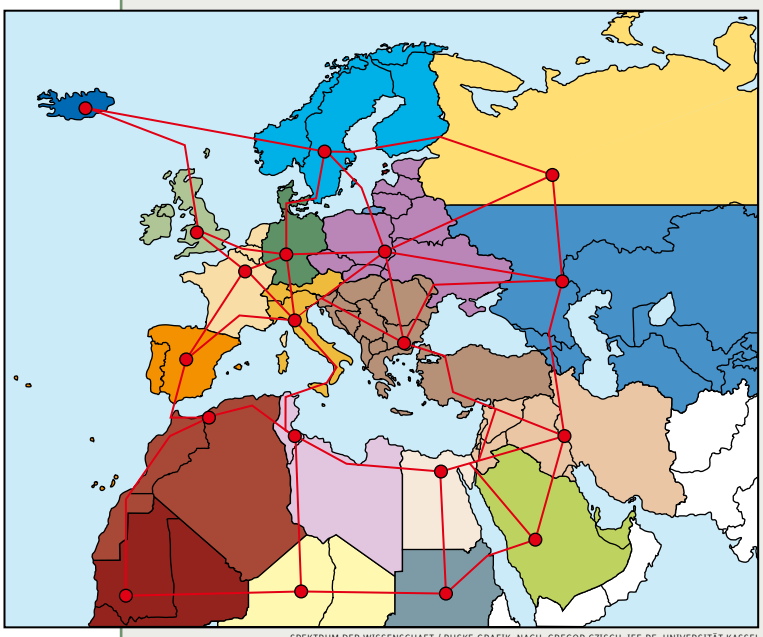
**In Europa ließe sich die Energiewende – zumindest beim Strom – bereits in 20 Jahren erreichen. Die Fotovoltaik würde dabei jedoch keine Rolle spielen.**

Von Gerhard Samulat

**Zumindest behauptet das Gregor Czisch** vom Institut für Elektrische Energietechnik der Universität Kassel. Die oft gestellte Frage, ob die regenerativen Energien es überhaupt schaffen können, die fossilen zu ersetzen, beantwortet er damit mit einem eindeutigen Ja. In seiner Dissertation untersuchte der Kasseler Physiker Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung Europas unter Einschluss einiger nordafrikanischer Staaten sowie weiter Teile Vorderasiens und Russlands. Dieses Gebiet, das vom Nordkap bis in den Tschad und von Island bis zum Ural reicht, beheimatet über eine Milliarde Menschen. Ihren derzeitigen jährlichen Stromverbrauch beziffert Czisch mit rund 4000 Terawattstunden. Dieser lässt sich nach Analysen des Wissenschaftlers vollständig durch regenerative Quellen decken.

Mit computergestützten Algorithmen suchte Czisch nach der ökonomisch günstigsten Versorgungsstruktur. Überraschenderweise kommt die Fotovoltaik dabei nicht zum Zuge. Denn unter der konservativen Annahme seines Grundszenarios, in dem ausschließlich bereits entwickelte Technologien zu heutigen Preisen eingesetzt werden, ist die Gewinnung von Strom aus Solarzellen verhältnismäßig teuer. Zu teuer: Czisch kalkuliert Preise zwischen 27 und 49 Euro-Cent pro Kilowattstunde. In seinem Szenario kommt der hessische Energieexperte hingegen auf durchschnittliche Stromkosten von 4,65 Euro-Cent pro Kilowattstunde. Das ist überraschend günstig. Beispielsweise erlösten die deutschen Stromkonzerne laut Angaben des Statistischen Bundesamts im Jahr 2006 10,46 Cent pro Kilowattstunde. Private Haushalte zahlten im gleichen Zeitraum im Mittel sogar 15,36 Cent. Ökostrom wäre nach Berechnungen des Energieforschers daher preiswerter als die heute vorzugsweise aus fossilen Quellen gewonnene Elektrizität.

**So könnten Europa und angrenzende Staaten in Gregor Czischs Szenario mit Strom versorgt werden. Die roten Linien deuten die Trassenverläufe für ein mögliches künftiges Gleichstromnetz an, das 19 Regionen miteinander verbindet.**



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: GREGOR CZISCH, IEE-RE, UNIVERSITÄT KASSEL

**Laut Czisch könnten Wasserkraft,** Biomasse und Solarthermie künftig ein Drittel des Strombedarfs decken. Der Löwenanteil mit gut zwei Dritteln würde hingegen aus Windkraftanlagen stammen, die in Nordafrika, Russland, Kasachstan oder beispielsweise auf den britischen Inseln ständen. Bemerkenswert ist, dass sein Grundszenario sogar auf Offshore-Windenergie-Parks verzichtet – sie wären ebenfalls zu teuer.

Doch ist für die Energiewende zunächst einmal eine neue Infrastruktur zu schaffen. Für die etwa zwei Jahrzehnte dauernde Anlaufphase rechnet der Kasseler Analytiker mit jährlichen Investitionen von rund 78 Milliarden Euro. Das entspricht jeweils grob sechs Promille des Bruttoinlandsprodukts (BIP) des Jahres 2002 im Szenariogebiet. Zum Vergleich: Jedes Jahr investieren die EU-15-Länder, die USA oder Japan brutto zwischen 16 und 25 Prozent, also um das 25- bis 40-Fache mehr, in ihre Industrieanlagen. Ein Zusatzposten für die Energieinfrastruktur scheint also verkraftbar. Zudem schätzen Experten des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung, dass Europa bis zum Jahr 2020 ohnehin 370 Milliarden Euro für neue Kraftwerke und den Ausbau der Netzinfrastruktur aufbringen muss. Der weltweite Investitionsbedarf für neue Kraftwerke bis zum Jahr 2030 liegt nach Schätzungen der Internationalen Energieagentur in ihrem »World Energy Outlook 2006« sogar bei 11 Billionen US-Dollar.

In rund 20 Jahren könnte die neue Infrastruktur stehen und Europa einen großen Teil der Öl- und Gasimporte sparen. Das lohnte sich, schließlich gibt die EU laut einem Bericht des Europäischen Parlaments vom 5. Januar 2007 bei einem Preis von 50 Euro pro Barrel jährlich allein 250 Milliarden Euro für Ölimporte aus, was 2,3 Prozent des EU-BIPs entspricht.

Am teuersten käme in diesem Szenario der Bau neuer Windräder. Doch auch das mit Gleichstrom betriebene Hochspannungsnetz, das ähnlich wie bei dem im nebenstehenden Beitrag dargestellten US-Szenario eine zentrale Rolle spielt, kostet Milliarden. Es müsste mit den nationalen Wechselspannungsnetzen verbunden werden und würde fast die Hälfte des in verschiedenen Regionen erzeugten Stroms zu entfernten Abnehmern transportieren. Ein ausgeklügeltes Lastenmanagement müsste schließlich dafür sorgen, dass es nirgendwo in Europa oder bei seinen ans Netz angeschlossenen Nachbarn dunkel wird. ‹‹

**Gerhard Samulat** ist Diplomphysiker und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

**Literaturhinweis:** Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung. Kostenoptimierte Variationen zur Versorgung Europas und seiner Nachbarn mit Strom aus erneuerbaren Energien. Von Gregor Czisch, 2006. Online unter https://kobra.bibliothek.uni-kassel.de/handle/urn:nbn:de:hebis:34-200604119596

nungs-Gleichstromleitungen (HVDC, High Voltage Direct Current) über lange Distanzen hinweg weniger Energieverluste anfallen als in Wechselstromleitungen. Ein HVDC-Netz würde vom Südwesten strahlenförmig bis an die Grenzen des Landes verlaufen und jeweils an Konverterstationen enden, die den Gleichstrom in Wechselstrom umwandeln, sodass er über herkömmliche regionale Leitungen zum Endverbraucher transportiert werden kann.

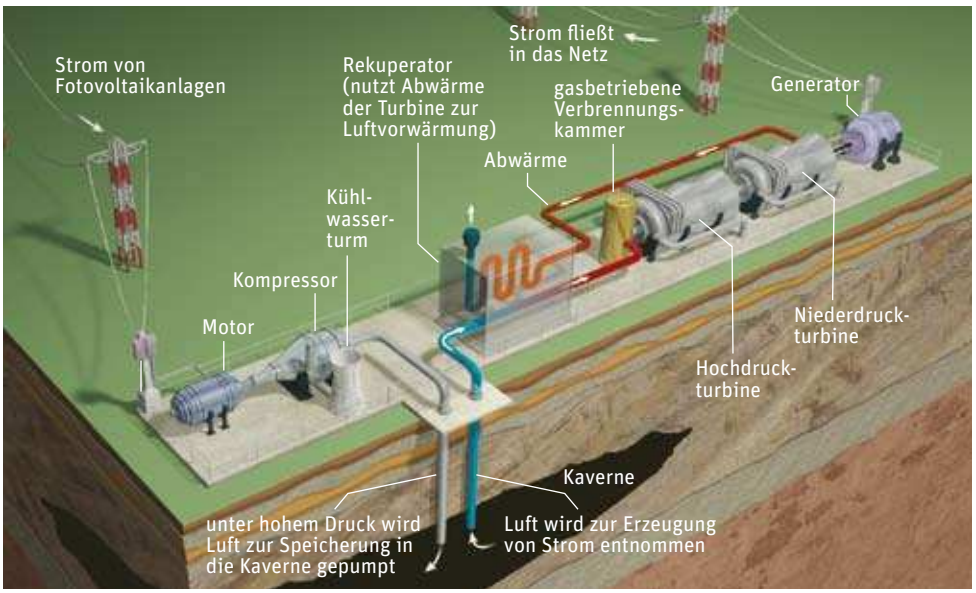
Weil das heutige Wechselstromnetz überlastet ist, kam es bereits zu Stromausfällen in Kalifornien und anderen Regionen. Gleichstromleitungen sind billiger zu errichten und benötigen weniger Grundfläche als entsprechende Wechselstromleitungen. In den USA sind heute bereits etwa 800 Kilometer HVDC-Leitungen in Betrieb und erweisen sich als zuverlässig und effizient. Größere technische Fortschritte scheinen daher nicht mehr vonnöten, lediglich der laufende Betrieb ließe sich mit mehr Erfahrung noch optimieren. Derzeit entwickelt der Southwest Power Pool in Texas, dem die Aufsicht über die Zuverlässigkeit der Stromtransportleitungen in der Region obliegt, ein integriertes System aus Gleich- und Wechselstromleitungen, das es erlauben soll, Windkraftanlagen mit einer Leistung von 10 GW im westlichen Texas zu errichten. Und das kanadische Unternehmen Transcanada will eine 3500 Kilometer lange HVDC-Leitung bauen, die Windenergie aus den Bundesstaaten Montana und Wyoming in südliche Richtung nach Las Vegas und darüber hinaus transportiert.

Die Möglichkeiten zur Realisierung des Solar Grand Plan haben wir mit besonderer Sorgfalt geprüft. Geeignet erscheint uns ein Zwei-Phasen-Vorgehen. In der ersten Phase, die von jetzt bis 2020 dauert, sollen Solaranlagen zu preisgünstigen Massenerzeugnissen werden. Dafür muss die US-Regierung über 30 Jahre laufende Darlehen gewähren, sich

**Gleichstromleitungen sind billiger zu errichten, zudem ist das heutige US-Wechselstromnetz ohnehin bereits überlastet**

POWERSOUTH ENERGY COOPERATIVE

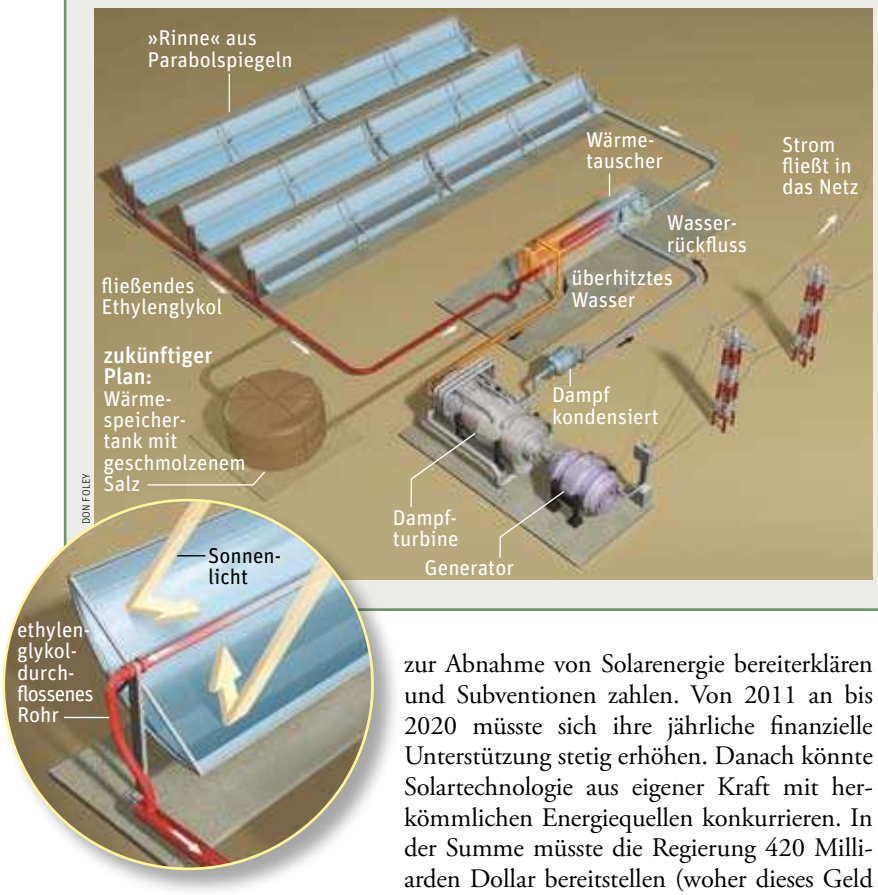
**Überschüssige Elektrizität, die Fotovoltaikanlagen tagsüber erzeugen, kann mit Hilfe von Überlandleitungen zu Druckluftenergiespeichern in der Nähe großer Städte geleitet werden. Diese Technologie ist bereits verfügbar. Die Anlage der PowerSouth Energy Cooperative in McIntosh im US-Bundesstaat Alabama ist schon seit 1991 in Betrieb.**




DON FOLEY

**Bei Konzepten wie dem der oben genannten Anlage setzt eintreffender Strom Motoren und Kompressoren in Gang. Sie verdichten die Luft und pumpen sie in leere Kavernen oder stillgelegte Minen. Diesen Speicher kann man nachts anzapfen. Man lässt die komprimierte Luft wieder ausströmen und erhitzt sie zusätzlich durch das Verbrennen kleiner Mengen von Erdgas. Schließlich treibt die heiße, expandierende Luft eine Strom erzeugende Turbine an.**

## Parabolrinnenkraftwerk




**Große Parabolrinnenkraftwerke** sollen die Fotovoltaikfarmen im Südwesten ergänzen. Das Kramer-Junction-Kraftwerk in der kalifornischen Mojave-Wüste, errichtet von der Firma Solel mit Sitz im israelischen Beit Shemesh, ist seit 1989 in Betrieb. Bei diesem Anlagentyp fokussieren bewegliche Parabolspiegel, die dem Stand der Sonne folgen, deren Strahlung auf ein Rohr. Dabei erhitzt sich die darin befindliche Flüssigkeit, zum Beispiel Ethylenglykol. Die heißen Rohre führen zu einem Wärmetauscher, wo die Wärme auf ein zweites, wassergefülltes Rohrsystem übergeht. Das Wasser verdampft dabei und der Dampf treibt eine Turbine an. Zukünftige Kraftwerke dieses Typs werden die heiße Flüssigkeit auch durch einen Speichertank mit geschmolzenem Salz leiten, das die Wärme kurzzeitig speichert. Nachts wird sie dann »abgezapft«, um ebenfalls die Turbine anzutreiben.

zur Abnahme von Solarenergie bereiterklären und Subventionen zahlen. Von 2011 an bis 2020 müsste sich ihre jährliche finanzielle Unterstützung stetig erhöhen. Danach könnte Solartechnologie aus eigener Kraft mit herkömmlichen Energiequellen konkurrieren. In der Summe müsste die Regierung 420 Milliarden Dollar bereitstellen (woher dieses Geld kommen könnte, zeigen wir später).

In dieser ersten Phase müssten Fotovoltaik- und Parabolrinnenkraftwerke mit einer Gesamtleistung von rund 84 GW installiert werden. Parallel dazu wäre das Gleichstromnetz auszubauen, und zwar entlang der amerikanischen »Interstate«-Autobahnen, wo bereits entsprechende Durchleitungsrechte bestehen. Die Notwendigkeit für Landkäufe ebenso wie für das Einholen behördlicher Genehmigungen lässt sich dadurch minimieren. Die Haupttrasse soll große Abnahmegebiete wie Phoenix, Las Vegas, Los Angeles und San Diego im Westen sowie San Antonio, Dallas, Houston, New Orleans, Birmingham (Alabama), Tampa (Florida) und Atlanta im Osten versorgen.

In den ersten fünf Jahren kämen jährlich 1,5 GW an installierter Leistung aus Fotovoltaikanlagen hinzu, dieselbe Leistung steuerten neue Parabolrinnenkraftwerke bei. Für viele Hersteller wäre dies ein Anreiz, ihre Kapazitäten auszubauen. In den folgenden fünf Jahren wird der Ausbau auf jährlich 5 GW pro Kraftwerkstyp hochgefahren. Das Wachstum hilft den Firmen bei der Optimierung ihrer Produktion, sodass der Preis für Solarstrom deutlich sinkt. Der Zeitplan ist durchaus realistisch. Allein von 1972 bis 1987 wurden in den USA jährlich durchschnittlich über 5 GW Leistung aus Kernkraftwerken installiert. Solaranlagen hingegen können viel schneller hergestellt und errichtet werden – wegen ihres vergleichsweise einfachen Aufbaus, aber auch, weil Umwelt- und Sicherheitsprobleme eine viel geringere Rolle spielen.

**Nach fünf Jahren wird der Ausbau auf jährlich 10 Gigawatt Leistung aus Solarkraftwerken hochgefahren**

Unserem Szenario für die Jahre zwischen 2020 und 2050 legten wir konservative Annahmen zu Grunde. Technologische und kostensenkende Verbesserungen, die nach 2020 zum Tragen kommen könnten, ließen wir unberücksichtigt. Wir gingen zudem davon aus, dass die Stromnachfrage landesweit um ein Prozent pro Jahr ansteigt. In diesem Szenario liefern Solarkraftwerke im Jahr 2050 rund 70 Prozent der in den USA erzeugten Elektrizität und decken 35 Prozent des gesamten Energiebedarfs. Diese Zahlen schließen auch den Strom für den Betrieb von 344 Millionen Hybridfahrzeugen ein. Benzinbetriebene Fahrzeuge würden verdrängt, was entscheidend zur Verringerung der Abhängigkeit von Öleinfuhren und zur Reduzierung von Treibhausgasen beitrüge. Und schließlich entstünden rund 3 Millionen neue Arbeitsplätze, vor allem in der Herstellung von Komponenten für Solarkraftwerke – ein Vielfaches der Jobs, die in der dann schrumpfenden Öl-, Gas- und Kohle-Industrie verloren gingen.

Durch die sinkenden Ölimporte würde sich die US-Außenhandelsbilanz um jährlich 300 Milliarden Dollar verbessern (bei einem Rohölpreis von 60 Dollar pro Barrel, der Durchschnittspreis für 2007 liegt allerdings schon bei etwa 74 Dollar). Zwar müssen auch Solarkraftwerke gewartet und repariert werden, doch die

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (WWW.NREL.GOV)

Sonnenenergie selbst bleibt auf Dauer kostenlos, sodass sich die Einsparungen beim Öl Jahr für Jahr wiederholen werden. Außerdem erhöhen die Solaranlagen die Sicherheit der nationalen Stromversorgung, reduzieren Kosten für das Militär und verringern dank umwelt- und klimaschonender Arbeitsweise auch die gesellschaftlichen Folgekosten. Der Solar Grand Plan dürfte den Energieverbrauch sogar mindern. Selbst wenn die Nachfrage um ein Prozent pro Jahr wüchse, *fiele* der Verbrauch von 105 Exajoule im Jahr 2006 auf 98 EJ im Jahr 2050! Der Grund: Heute wenden wir einen beträchtlichen Teil der Energie auf, um fossile Brennstoffe zu gewinnen und aufzubereiten; weitere Energie geht bei ihrer Verbrennung und bei der Emissionskontrolle verloren.

## Wie sieht die Welt in 100 Jahren aus?

Um die Vorgaben für 2050 zu erreichen, werden rund 120 000 Quadratkilometer Fläche für die Installation von Fotovoltaik- und Parabolrinnenkraftwerken benötigt. Diese Zahl erscheint riesig, entspricht aber lediglich knapp 20 Prozent der im Südwesten geeigneten Landfläche, die meist unwirtlich ist und sich anderweitig nicht nutzen lässt. Damit es nicht zu gegenseitigen Abschattungen kommen kann, sehen wir bei unseren Flächenberechnungen genügend Platz vor: Wir multiplizieren die Modulfläche mit dem Faktor 2,5, um die insgesamt benötigte Landfläche zu ermitteln. Bei Parabolrinnenkraftwerken beträgt dieser Faktor 3.

Verteilte Fotovoltaikanlagen, etwa auf Firmengeländen oder Hausdächern, liefern im Jahr 2050 nur 10 Prozent der Solarenergie. Je nachdem, wie stark die Preise sinken, könnten sie aber auch eine größere Rolle spielen.

Exakte Prognosen, die 50 oder mehr Jahre in die Zukunft reichen, sind natürlich unmöglich. Versuchsweise führten wir dennoch Hochrechnungen durch, um das volle Potenzial der Solarenergie im Jahr 2100 darzustellen. Wir gingen von einem Gesamtenergieverbrauch (inklusive Transport) von knapp 150 EJ aus und davon, dass die Stromerzeugungskapazitäten in jenem Jahr unsere heutigen um das Siebenfache übertreffen werden.

Zunächst schätzten wir die installierte Leistung von Solarkraftwerken ab, die zur Erzeugung dieser Energie nötig wäre. Um weiterhin konservativ zu rechnen, gingen wir von einem historischen Tiefststand der Sonneneinstrahlung auf den Südwesten aus. Ein solcher Tiefststand wurde im Winter von 1982 auf 1983 und in den Jahren 1992 und 1993, im Anschluss an die Eruption des philippinischen Vulkans Pinatubo von 1991, verzeichnet. Dies lässt sich aus der Nationalen US-Datenbank für Sonnenstrahlung ermitteln, die den Zeitraum von 1961 bis 2005 umfasst. Außerdem nahmen wir wiederum an, dass es nach 2020 zu keinen weiteren technologischen oder ökonomischen Verbesserungen kommt, obwohl in den verbleibenden 80 Jahren damit ziemlich sicher zu rechnen ist. Unter diesen Annahmen könnte der US-Strombedarf mit folgenden Kraftwerkskapazitäten gedeckt werden: 2,9 Terawatt aus Fotovoltaikkraftwerken würden direkt in die Netze eingespeist, weitere 7,5 TW in Druckluftspeicher geleitet.

## GENIALER PLAN ODER TRÄUMEREI?

- **Diskutieren Sie mit!** Auf unserem Online-Blogportal www.wissenslogs.de lädt Sie Chefredakteur Reinhard Breuer ein, über den Solar Grand Plan, die Zukunft der Solarenergie und über ihre Alternativen nachzudenken.
- **Hier geht's zur Diskussion:** Surfen Sie im Internet zu www.wissenslogs.de/solargrandplan. Dort müssen Sie nur Ihre E-Mail-Adresse angeben und können sofort mitmachen.

**Ken Zweibel** (oben), **James Mason** (links) und **Vasilis Fthenakis** (rechts) lernten sich vor zehn Jahren kennen, als sie gemeinsam an einem Projekt zur Ermittlung der Lebensdauer von Solarzellen arbeiteten. Zweibel ist Chef der Firma PrimeStar Solar in Golden (Colorado). 15 Jahre lang war er Manager am ebenfalls in Golden angesiedelten Nationalen Labor für erneuerbare Energien und dort für Dünnschicht-Technologien verantwortlich. Mason ist Gründer des Unternehmens Solar Energy Campaign und Direktor des Instituts für Wasserstoffforschung in Farmingdale im US-Bundesstaat New York. Fthenakis leitet ein Forschungszentrum für Fotovoltaik am Brookhaven National Laboratory in Upton (New York) sowie ein Zentrum an der New Yorker Columbia-Universität, das sich mit Lebenszyklusanalysen von Energieerzeugungssystemen beschäftigt. Hier lehrt er auch als Professor.

Eine ausführliche Fassung des »Solar Grand Plan« durchläuft derzeit die Begutachtungsverfahren bei Fachzeitschriften. Online werden diese und weitere Publikationen zu gegebener Zeit unter www.clca.columbia.edu/publications.html zu finden sein.

Jahrbuch Erneuerbare Energien 2007. Von Frithjof Staiß. Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg (Hg.). Bieberstein-Verlag, Radebeul 2007

Wer im Treibhaus sitzt. Wie wir der Klima- und Energiefalle entkommen. Von Konrad Kleinknecht. Piper, München 2007

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/940406.

Hinzu kämen 2,3 TW aus Parabolrinnenkraftwerken sowie 1,3 TW aus verteilten Fotovoltaikanlagen. Ergänzt würde die Versorgung durch 1 TW aus Windfarmen und 0,2 TW aus geothermischen Kraftwerken. Die Produktion von Biotreibstoff auf Basis von Biomasse setzten wir mit 0,25 TW an. Die solaren Anlagen würden rund 430 000 Quadratkilometer Land überdecken – immer noch weniger, als der Südwesten bietet.

2100 könnten diese regenerativen Energiequellen 100 Prozent des US-Strombedarfs und 90 Prozent des Gesamtenergiebedarfs decken. Im Frühjahr und Sommer könnte die solare Infrastruktur genug Wasserstoff erzeugen, um 90 Prozent des Kraftstoffbedarfs im gesamten Transport- und Verkehrswesen zu liefern. Wasserstoff könnte dann auch das Erdgas ersetzen, das beim Betrieb der von Druckluftspeichern angetriebenen Turbinen eingesetzt werden muss. Zusätzlich würden 180 Milliarden Liter Biokraftstoff den verbleibenden Bedarf an Transportenergie decken. $CO_2$-Emissionen, die bei Energieerzeugung und -verbrauch anfallen, sänken um 92 Prozent unter ihr Niveau von 2005. All dies trotz des von uns veranschlagten jährlichen Wachstums des Energiebedarfs um ein Prozent.

## »Solar Grand Plan« ist billiger als Agrarsubventionen

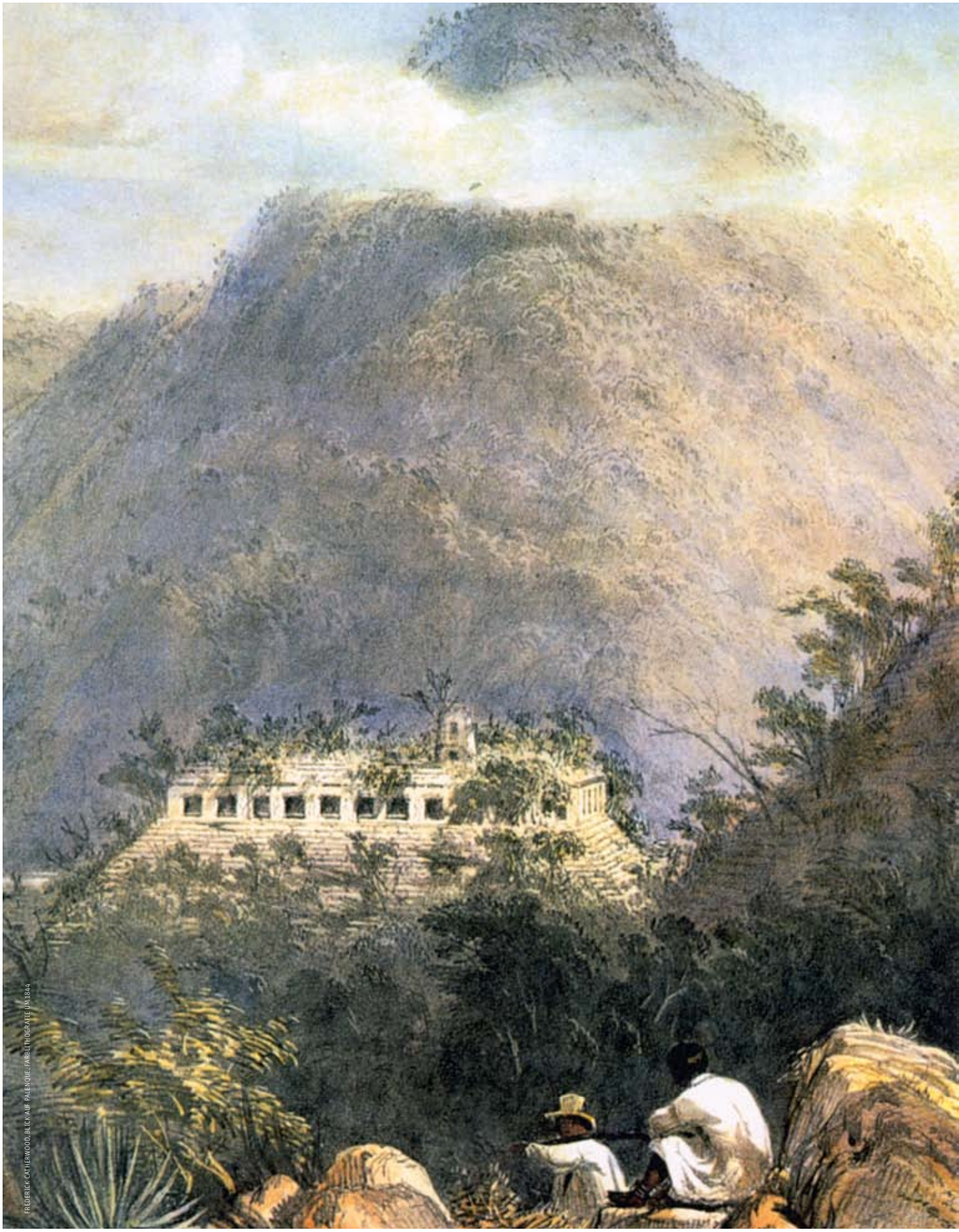
Die wohl wichtigste Frage ist indessen die nach der Finanzierung der solaren Infrastruktur. Eine der verbreitetsten Ideen hierzu ist die Einführung einer Steuer auf Kohle. Die Internationale Energieagentur (IEA) geht davon aus, dass sie 40 bis 90 Dollar pro Tonne Kohle betragen müsste, damit sie Stromproduzenten dazu anregt, mittels Verfahren zur $CO_2$-Abscheidung und -Speicherung die Emission von Kohlendioxid zu verringern. Diese Steuer entspricht einer Strompreiserhöhung um 1 oder 2 Cent pro kWh. Unser Plan ist billiger. Die 420 Milliarden Dollar, die der Staat zuschießen muss, können durch eine Steuer von 0,5 Cent auf jede kWh Strom eingenommen werden, die aus fossilen Energien erzeugt wurde. Bei heutigen Kosten von 6 bis 10 Cent pro kWh scheint dies tragbar.

Ein Subventionsprogramm für die US-Landwirtschaft wurde mit dem Argument der nationalen Sicherheit gerechtfertigt – schließlich müssten Lebensmittelversorgung und Preisstabilität gewährleistet sein. Ein National Renewable Energy Plan (Nationaler Plan für erneuerbare Energien) würde die Energieversorgung der USA sicherstellen und wäre damit ein zentrales Element des künftigen Wohlergehens der Nation. Die Beihilfen würden sukzessive im Zeitraum von 2011 bis 2020 ausgezahlt. Bei einer Laufzeit von üblicherweise 30 Jahren endet die Förderung zwischen 2041 und 2050. Für den Aufbau des HVDC-Netzes durch Privatfirmen würden keine Subventionen fließen müssen, da sie Netztrassen und Konverterstationen in gleicher Weise finanzieren würden wie das heutige Wechselspannungsnetz – durch Einkünfte, die sie bei der Lieferung von Strom erzielen.

420 Milliarden Dollar sind zwar sehr viel Geld. Die jährlich anfallenden Kosten würden jedoch geringer sein als die Subventionen, die derzeit in die US-Landwirtschaft fließen. Sie wären auch geringer als die steuerfinanzierten Subventionen, die in den vergangenen 35 Jahren in den Ausbau der Infrastruktur für die Hochgeschwindigkeitstelekommunikation investiert wurden. Und nicht zuletzt würde die USA durch diese Ausgaben unabhängiger von internationalen Energiekonflikten und ihren politischen und finanziellen Konsequenzen. Zu dem Schluss, dass der Solar Grand Plan ohne Subventionen nicht realisierbar ist, kamen unterdessen auch andere Nationen. Japan arbeitet bereits an der Errichtung einer großen, subventionierten solaren Infrastruktur; in Deutschland gibt es ein Gesetz, das feste Vergütungssätze für Energie aus erneuerbaren Energien garantiert.

Kritiker trugen verschiedene Bedenken vor wie etwa die Möglichkeit, dass Engpässe in der Materialversorgung die Großfertigung hemmen. Vorübergehend kann das durchaus der Fall sein. Doch es existieren verschiedene Typen von Solarzellen, die unterschiedliche Materialkombinationen einsetzen; außerdem wird der Materialverbrauch durch effizientere Produktionsprozesse sinken. Langfristig werden alte Solarzellen zudem zu neuen Zellen recycelt werden können.

Doch das größte Hindernis für die Umstellung der US-Energieversorgung auf erneuerbare Energien ist weder Technologie noch Geld, sondern der Mangel an öffentlichem Bewusstsein dafür, dass solare Energie eine praktikable Alternative darstellt und sogar die Energie für Transport und Verkehr liefern kann. Menschen mit Weitblick sollten daher versuchen, die Bürger der USA ebenso wie führende Persönlichkeiten aus Politik und Wirtschaft für das fast unglaubliche Potenzial der Solarenergie zu begeistern. Ist den Amerikanern dieses Potenzial erst einmal bewusst, dann wird ihr Wunsch nach nachhaltiger Energieversorgung und reduzierten $CO_2$-Emissionen sie schließlich davon überzeugen, dass wir die US-weite Einführung von Solarenergie auf den Weg bringen müssen. ◁



FREDERICK CATHERWOOD, BLICK AUF PALENQUE, FARBLITHOGRAFIE, UM 1844

# DAS KÖNIGREICH DER SCHLANGE

Tief im Dschungel Yukatans gelegen, offenbart die Maya-Metropole Calakmul erst seit wenigen Jahren ihre Geheimnisse. Vor allem eines: Calakmul war der Erzfeind der mächtigen Stadt Tikal.

Imposante Ruinen, die unvermutet aus dem Dschungel emporragen – so bot sich dem Briten Frederick Catherwood Mitte des 19. Jahrhunderts die Hochkultur der Maya dar. Heute wirken seine Illustrationen selbst wie romantische Erinnerungen an eine andere Welt, denn Maya-Metropolen wie das hier abgebildete Palenque sind heute gut erschlossene Touristenhochburgen. Nur das dank seiner abgeschiedenen Lage erst 1931 entdeckte Calakmul hat den Charme jener Entdeckerzeit bewahrt.

## Chronologie der Maya

**9000 – 3000 v. Chr. Archaik**

- älteste Funde, Maisanbau

**3000 – 1000 v. Chr. Frühe Präklassik**

- Feste Siedlungen, Ackerbau, Hierarchisierung der Gesellschaft

**1000 – 500 v. Chr. Mittlere Präklassik**

- Erste Monumentalarchitektur, Bevölkerungswachstum, früheste Siedlungsfunde bei Tikal um 600 v. Chr.

**500 v. Chr – 250 n. Chr. Späte Präklassik**

- Weiträumiger Handel, Gründung der Königsdynastie von Tikal, Machtkämpfe unter den Städten

**250 – 600 Frühe Klassik**

- Tikal gerät unter den Einfluss Teotihuacans und wird Machtzentrum im Tiefland, verliert dann aber diese Rolle an Calakmul.

**600 – 900 Späte Klassik**

- Calakmul erobert Tikal erneut, unterliegt wenige Jahre später aber in einer neuerlichen Auseinandersetzung. Gegen Ende des 8. Jahrhunderts allmählicher Machtverlust der Gottkönige.

**900 – 1500 Postklassik**

- 910 lässt ein Maya-Herrscher des südlichen Tieflands die letzte Stele aufstellen, 998 erfolgt die letzte Datumsangabe; die Städte werden noch bis 1200 teilweise bewohnt. Um 1200 wird Mayapan im nördlichen Tiefland gegründet, das bis ins 15. Jahrhundert die Region in steter Konkurrenz mit Chichén Itzá dominierte. Außerdem entstehen neue befestigte Besiedlungen auf Anhöhen am Rand des Tieflands.

**1500 – Mitte des 19. Jhs. Kolonialzeit**

- Die Spanier erobern 1528 bis 1542 das Maya-Kernland; Mexiko wird Kolonie.

Von Inés de Castro

Gerade 25 Jahre alt war Cyrus Longworth Lundell, als er am 29. Dezember 1931 im tropischen Regenwald Mexikos zwei Pyramiden der Maya entdeckte. Der Botaniker war eigentlich in Sachen Kautschuk unterwegs, einem damals gefragten Rohstoff. Beeindruckt von der Ruinenstätte nannte er sie Calakmul, denn in der Sprache der Maya bedeutet *ca* so viel wie »zwei«, *lak* heißt »benachbart« und *mul* bezeichnet einen künstlichen Hügel oder eine Pyramide.

Bald darauf informierte Lundell Sylvanus Griswold Morley, einen der führenden Experten für die versunkene Hochkultur. Erste Ausgrabungen folgten, doch Calakmul lag so abgelegen, dass die Arbeiten jahrzehntelang ruhten und erst 1982 wieder aufgenommen wurden; seit 1993 graben Archäologen die einstige Metropole nun systematisch aus – mit spektakulären Funden. Hauptbeteiligte: Die Archäologische Behörde des mexikanischen Bundesstaats Campeche unter der Leitung von Ramón Carrasco. Inzwischen zählten diese Grabung zu den renommiertesten Projekten auf mexikanischem Boden. Calakmul gehörte einst zu den ganz großen Stadtstaaten im Maya-Land und war der gefürchtetste Feind des im heutigen Guatemala gelegenen Tikal (siehe Karte).

Etwa fünfzig solcher Reiche konkurrierten im Tiefland Guatemalas und Mexikos miteinander in der als Klassik bezeichneten Periode (250 – 900 n. Chr., siehe Zeittafel). Ein Maya-Reich, vergleichbar dem Alten Ägypten oder dem römischen Imperium, hat es aber nie gegeben. Sprache, Lebensweise und Glaubenswelt bildeten die gemeinsame Klammer. An der Spitze eines jeden Maya-Staats stand ein als Gott verehrter Herrscher, der mit seinem Hofstaat aus Adligen und Priestern das Volk regierte. Seine Funktion als Mittler zwischen den ihm Anbefohlenen einerseits, den Göttern und Ahnen andererseits legitimierte ihn dazu, als König unumschränkt zu herrschen – schließlich sorgte er für sichere Ernten und galt als Quell der Weisheit.

Eine solche gesellschaftliche Ordnung entwickelt sich über Jahrhunderte und benötigt Rahmenbedingungen, die Zusammenarbeit erfordern. In Mittelamerika sind das vor allem Wasserknappheit und karge Böden. Nur wenige Flüsse durchqueren das Kerngebiet der Maya-Kultur. Ausreichende Niederschläge fallen dort nur im Sommer, während im Winter Trockenheit herrscht. Weil das Grundgestein großteils aus Kalkstein besteht, versickert das Wasser obendrein bis zu undurchlässigen Schichten und bildet unterirdische Flüsse oder Seen. Schon etwa ab 1800 v. Chr. entwickelten die Maya Strategien, um Ressourcen optimal zu nutzen. Sie siedelten in der Nähe eingebrochener Karsthöhlen oder an Regenwasser speichernden Senken, bohrten Brunnen oder bauten große Zisternen. Terrassierung fruchtbarer Hangflächen und die Anlage von Hochäckern steigerten ab etwa 300 n. Chr. im Verbund mit einer künstlichen Bewässerung den Ernteertrag und ermöglichten somit ein Bevölkerungswachstum.

Solche Entwicklungen förderten in der Menschheitsgeschichte meist die Ausbildung gesellschaftlicher Hierarchien: Eliten organisierten die Anlage von Brunnen und kontrollierten deren Erhalt. Nur sie besaßen die Macht, ebenso gemeinnützige Arbeiten zu befehlen wie Maßnahmen zur Verteidigung einer Siedlung. Und mit der Zeit wurden aus Führungspositionen Institutionen, deren Angehörige immer weiter vom einfachen Volk abrückten und nach Erweiterung der eigenen Macht strebten. Nannten die Maya ihre Anführer in der Vorklassik noch *ajaw*, so bezeichneten sie die Regierenden zur Zeit der Klassik als *k'uhul ajaw*, als göttliche Herrscher.

Orte, die Überschüsse erwirtschafteten, gelangten durch den Handel zu Wohlstand. Weil manche mit natürlichen Ressourcen üppiger gesegnet waren als andere oder diese besser zu nutzen wussten, wurden sie mächtiger als andere.

### Schriftzeichen der Mächtigen

Diesen Wandel erkennen Archäologen vor allem an Siedlungsstrukturen und Grabbeigaben, lesen Epigrafiker aus Inschriften (siehe Kasten S. 77). Schriftzeichen wurden in Stein geschlagen und in Jade, Muscheln, Knochen oder Holz eingeritzt, auf Fassaden und auf Keramik gemalt, in Stuck gedrückt oder auf Blättern aus Rindenpapier geschrieben, den so genannten Kodizes. Inschriften zieren monumentale Bauten, vor allem aber Stelen genannte Gedenksteine, die ein *k'uhul ajaw* zur Feier wichtiger Ereignisse errichten ließ. Sicher konnten nur Adlige und Priester, mithin maximal fünf Prozent der Bevölkerung eines Staats, die Hieroglyphen lesen, doch weit mehr wussten sie vermutlich zu deuten. Denn die Texte dienten der Propaganda. Der Gottkönig dokumentierte darin, dass er – kraft der Herkunft von den mythischen Ahnen – seine religiösen und politischen Pflichten erfüllte und somit zu Recht auf dem Thron saß. Dazu gehörte der Vollzug von Ritualen, welche die kosmische Ordnung aufrecht hielten. Doch auch politische und militärische Erfolge hatte ein Herrscher vorzuweisen.

Weil die meisten Stelentexte mit einem Datum beginnen, können Experten den Aufstieg und Fall ganzer Königsdynastien nachvollziehen – mit der bei propagandistischen Texten gebotenen Vorsicht. Unter den Orten im Kerngebiet des Tieflands konnte sich demnach Tikal im 4. Jahrhundert zur führenden Macht aufschwingen. Die Könige dort beriefen sich auf einen Dynastiegründer namens Yax Eeb' Xook (zu übersetzen mit »Erste Stufe Haifisch«), der – so wurde es aus den Regierungsdaten seiner Nachfolger errechnet – wohl in der zweiten Hälfte des 1. Jahrhunderts n. Chr. regierte.

## Yukatan – das Land der Maya

**Das Maya-Kernland umfasste** ganz Guatemala, die mexikanischen Bundesstaaten Chiapas und Tabasco sowie die Halbinsel Yukatan, Belice und Teile von Honduras und El Salvador, ein Gebiet von etwa der Fläche der heutigen Bundesrepublik. Zur Zeit der Maya-Klassik lebten dort gut zwanzig Millionen Menschen, heute etwa acht Millionen Nachfahren dieses Indianervolks.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH: RÖMER- UND PELIZÄUS-MUSEUM HILDESHEIM

Der kometenhafte Aufstieg Tikals war allerdings fremdgesteuert, so vermutet der deutsche Epigrafiker Nikolai Grube von der Universität Bonn. Inschriften verraten, dass im Jahr 378 n. Chr. eine Gruppe fremder Krieger unter einem General namens Siyaj K'ak' (zu Deutsch »aus dem Feuer geboren«) die Stadt überfiel und vermutlich den amtierenden König tötete. An seiner statt inthronisierten sie einen Prinzen Teotihuacans, der rund tausend Kilometer entfernt in Zentralmexiko gelegenen Heimatstadt der Invasoren. Als Bündnispartner dieser Metropole gewann Tikal an Einfluss.

Dass der immer wieder neu errungen werden musste und keineswegs von Dauer war, wissen die Forscher, seitdem in Calakmul wieder gegraben wird. Texte und Darstellungen auf mehr als 120 Stelen erzählen eine spannende Geschichte, reich ausgestattete Königsgräber und beeindruckende Malereien unterstreichen die Bedeutung des Orts, der etwa ab 400 v. Chr. besiedelt war und in der Späten Klassik, also zwischen 600 und 900 n. Chr., seine Blütezeit hatte.

## 6000 Gebäude und Monumente

Anders als im Alten Orient, der griechischen und römischen Antike oder im europäischen Mittelalter trennte bei den Maya keine Mauer innen und außen, Stadt und Land. Das urbane Zentrum bestand aus dem Palast der Königsfamilie, kleineren Adelspalästen, Tempeln und Plätzen. Dort standen Altäre und Stelen; bei religiösen Feiern durfte auch das gemeine Volk den Bereich betreten. Das bewohnte in den Randbereichen kleine Häuser aus Holz und Lehm. Und die waren mit zunehmender Entfernung vom Stadtkern immer dünner besiedelt. So lebten etwa 400 bis 2000 Menschen pro Quadratkilometer des Stadtgebiets, aber nur noch 100 bis 200 pro Quadratkilometer im ländlichen Umland. Kleinere Staaten umfassten insgesamt gerade mal einen Quadratkilometer, Tikals und Calakmuls Zentren allein aber bedeckten jeweils etwa 25 Quadratkilometer. Während europäische Metropolen dieser Zeit nur einige tausend Einwohner zählten, lebten in großen Mayastädten bis zu 100 000 Menschen.

So belegt auch die schiere Größe Calakmuls dessen Bedeutung. Über 6000 Gebäude und Monumente konnten mittlerweile von den Archäologen erfasst werden. Sechs Gebäudekomplexe stehen im Mittelpunkt, die als Wohnbereiche des Adels dienten und um einen großen Platz, die Große Plaza, gruppiert waren. Um die Siedlung herum lagen mehrere Senken, in denen sich während der Regenzeit Wasser sammelte.

Eine Hieroglyphe mit einem Schlangenkopf – *kaan* gelesen – taucht in den Inschriften immer wieder auf (siehe Bild S. 78). Sie stellt das Hauptzeichen der so genannten Emblemhieroglyphe des Orts dar – ein Titel, der den Träger als göttlichen Herrscher auswies und zudem die Dynastie benannte, die in Calakmul eines ihrer wichtigsten Zentren hatte. Wann sie ihren Hauptsitz ganz dorthin verlegte, ist noch unklar.

Der Aufstieg dieser Familie begann den Hieroglyphentexten zufolge im 5. Jahrhundert. Während Tikal durch militärische Expansion bereits den Süden des Maya-Tieflands dominierte, setzte die Dynastie der Schlange im Norden zunächst auf Bündnispolitik. Ihr

## Vier Zeichen für den König

a

AJAW

b

AJAW

c

AJAW-wa

d

a-AJAW-wa

**Aufbau und Merkmale** der Maya-Hieroglyphen waren lange Zeit ein Rätsel. Sie galten als Bildzeichen, von denen jedes einen Begriff repräsentierte. Doch statt der dem typischen Wortumfang einer Sprache gemäßen einigen tausend Glyphen existierten nur etwa 700. Es hätte also nicht für jeden Begriff ein Bildzeichen gegeben – unwahrscheinlich. Der erste Durchbruch in der Entzifferung gelang dem russischen Forscher Juri Knorozow in den 1950er Jahren. Als eine Art »Rosetta-Stein« dienten ihm die Aufzeichnungen des spanischen Bischofs Diego de Landa aus dem 16. Jahrhundert, der einen Maya-Adligen zu den Hieroglyphen befragt hatte. Weil mit dem Landa-Alphabet aber keine sinnvollen Übersetzungen gelungen waren, hielten Experten es für eine Fälschung. Knozorow erkannte, dass der Bischof bei seinem Entzifferungsversuch von einer Art Alphabet ausging, vergleichbar dem spanischen. Dementsprechend hatte er den Maya nach Schriftzeichen gefragt, die den Buchstaben des ihm bekannten Alphabets entsprachen, erhielt aber beispielsweise für ein »b« ein Zeichen mit dem Lautwert »be«.

Knorozow entdeckte einige der Zeichen aus dem Landa-Manuskript in einem der wenigen erhaltenen Maya-Bücher. Damit war klar, dass diese Kultur keine reine Bilderschrift benutzt hatte. Doch auf Grund des Kalten Kriegs sollte es bis in die 1970er Jahre dauern, bis sich sein Ansatz auch im Westen durchsetzen konnte. Seitdem gelangen US-amerikanischen und europäischen Maya-Forschern entscheidende Fortschritte, heute ist die Maya-Schrift zum großen Teil lesbar.

Sie umfasst zwei Arten von Symbolen: Wort- und Lautzeichen (Logogramme und Phonogramme). Ein Schreiber konnte Wort- oder Silbenzeichen oder eine Kombination von beiden verwenden. Zusätzlich benutze man so genannte phonetische Komplemente: Silbenzeichen, die Anfangs- beziehungsweise Endlaute von Logogrammen kennzeichnen. Für den »König« *ajaw* gab es deshalb die Schreibweisen: als Logogramm AJAW in verschiedenen Versionen (a und b), als Logogramm mit einem phonetischen Komplement zu Beginn oder am Ende – a-AJAW oder AJAW-wa (c) – oder beidem a-AJAW-wa (d). Glyphenblöcke wurden von links nach rechts und von oben nach unten jeweils paarweise in Zweierspalten gelesen.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH: ROEMER- UND PELIZAEUS-MUSEUM HILDESHEIM

wachsendes politisches Gewicht ist in diversen Nachbarorten klar an Inschriften abzulesen: Abgesandte wurden als wichtige Gäste bei Ritualen in Yaxchilán oder bei der Thronbesteigung eines wenig bedeutenden Herrschers aus Naranjo genannt. Heiraten zwischen Herrscherhäusern festigten die Kontakte. Bald konnten sich die Schlangenkönige einen forscheren Ton erlauben und setzten bei ihren Partnern und in eroberten Staaten loyale Herrscher auf den Thron. Sie bedrohten widerspenstige Staaten mit Krieg, boten treuen Vasallen hingegen Schutz. Calakmul erhielt Tribute in Form von Waren und Arbeitskräften und belohnte Wohlverhalten durch teilweise Rückerstattung.

Bislang wurden weder Inschriften noch sonstige Hinweise entdeckt, die uns verraten würden, wie Tikal diese Entwicklung beurteilte. Doch dürfen wir wohl annehmen, dass es den Aufstieg des etwa hundert Kilometer entfernten Calakmul genau beobachtete. Früher oder später war eine direkte Konfrontation nicht zu vermeiden.

## Hierarchie der Könige

Noch vor dreißig Jahren galten die Maya als friedliches Volk von Sternbeobachtern, doch seit der weit gehenden Entzifferung ihrer Schrift wissen wir, dass das Gegenteil der Fall war. Wie und warum die Maya aber Kriege führten, diskutieren Forscher immer noch kontrovers. Entsprechende Texte berichten, dass ein Streit um Territorien und Ressourcen häufig mit Waffengewalt ausgetragen wurde, aber auch ein Mangel an Arbeitskräften oder Frauen begründete manchen Raubzug. Ab dem 6. Jahrhundert n. Chr. trat ein neues Motiv in den Vordergrund: das Streben nach Hegemonialherrschaft. Expansion hatte nun nicht primär Landgewinn zum Ziel, sondern sollte den Einflussbereich des Königs ausweiten. Die Inschriften beweisen, dass Herrscher nicht gleich Herrscher war – es gab eine Hierarchie unter Königen.

Dementsprechend krönte die Gefangennahme Adliger – zeitgenössischen Darstellungen zufolge war Krieg eine Angelegenheit des Adels – oder gar des gegnerischen Königs jede Schlacht. Ein häufiger Titel von Herrschern war »Fänger von«, gefolgt von einem Namen. Die Gefangenen wurden den Göttern geopfert, mitunter aber erst nach Jahren der Gefangenschaft. Christian Prager vom Institut für Altamerikanistik und Ethnologie der Universität Bonn vermutet, dass dies durchaus Kalkül war. Denn solange ein Herrscher lebte, blieb sein Thron verwaist, konnte also kein Nachfolger die Regierungsgewalt übernehmen und kein Nachkomme gezeugt werden.

Der große Krieg zwischen Tikal und Calakmul, so fanden die Epigrafiker Simon Martin aus dem Londoner University College und Nikolai Grube heraus, entbrannte im Jahr 562. Tikals Herrscher Wak Chan K'awiil (zu Deutsch »Doppelter Vogel« K'awiil – Letzterer war der Schutzgott der Königsdynastien) hatte im Vasallenstaat Caracol einen Adligen hinrichten lassen. Caracol ließ sich dies nicht gefallen und schloss daraufhin ein Bündnis mit Calakmul.

Dieser Allianz gelang es, Tikal so vernichtend zu schlagen, dass es offenbar 130 Jahre lang keinerlei politische Rolle mehr spielte – so lange wurden dort jedenfalls weder neue Gebäude errichtet noch Stelen aufgestellt. Ca-

### Jade – das grüne Gold der Maya

MUSEO ARQUEOLÓGICO FUERTE DE SAN MIGUEL; FOTO: I. CASES, TENERIFE

RAMÓN CARRASCO

**Jade war überaus kostbar** und hatte religiöse Bedeutung. Der Stein wurde im Südosten des heutigen Guatemala gewonnen und im ganzen mittelamerikanischen Raum gehandelt. Mit einfachen Sägen, Bohrern, Feuersteinklingen und Schleifmitteln fertigten Maya-Handwerker daraus Ohrpflöcke, Ketten, Armbänder und allerlei Accessoires für die Kleidung – Insignien der Elite, die oft über Generationen vererbt wurden.

Zu den seltensten Funden gehören acht Masken aus Jademosaik, vermutlich auf einem hölzernen Hintergrund befestigt. Als kostbare Grabbeigaben hielten sie die Gesichtszüge bedeutender Herrscher fest, damit diese sofort in der Unterwelt erkannt wurden (kleines Foto: Yuknoom Yich'aak K'aak; großes Foto: die Identität dieses Herrschers ist noch unbekannt). Calakmul weist die größte Anzahl an Jademasken auf: Neun Stück sind bislang in Königsgräbern entdeckt worden.

Die grüne Farbe des Gesteins symbolisierte den sprießenden Mais. Ein verstorbener Herrscher, der sich mit reichem Schmuck aus Jade bestatten ließ, war demnach dem Maisgott gleichgesetzt und durfte auf Erneuerung hoffen – die Maispflanze symbolisierte den Zyklus von Tod und Wiedergeburt.

## Pyramiden und Paläste

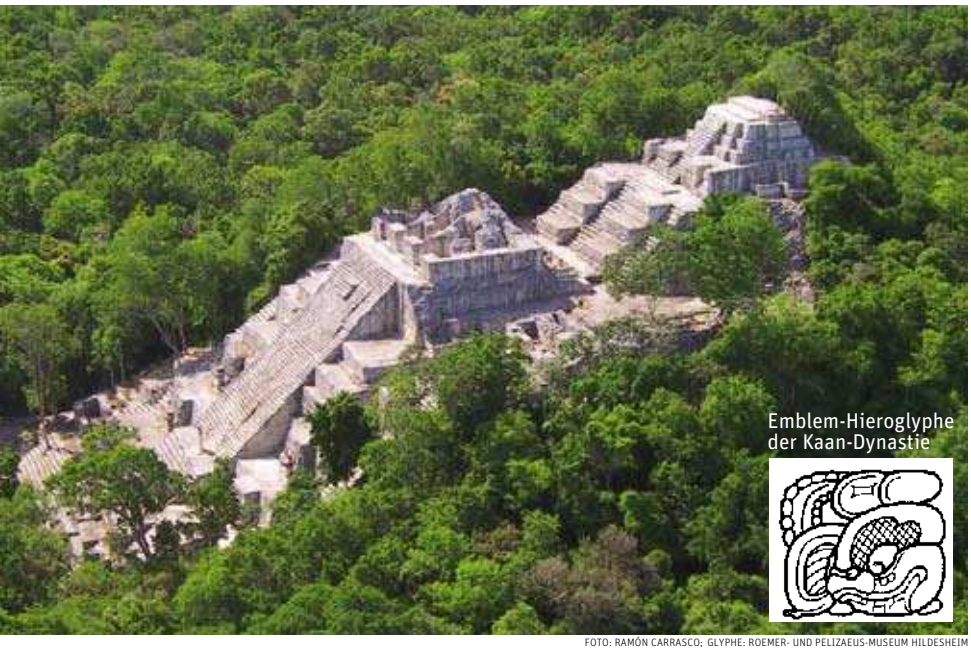
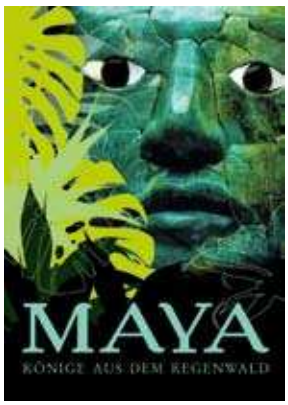



FOTO: RAMÓN CARRASCO; GLYPHE: ROEMER- UND PELIZAEUS-MUSEUM HILDESHEIM

**Stein trotzt dem Klima** des Regenwalds besser als Holz und Lehm. Schon in der Vorklassik diente deshalb Kalkstein als Baumaterial für Tempel und Paläste. Zum Schutz vor den starken Niederschlägen der Regenzeit standen die Gebäude auf Plattformen und waren über Treppen zugänglich. Genügte ein solches Bauwerk den Anforderungen nicht mehr, wurde es nicht abgerissen, sondern überbaut, sei es aus ökonomischen Gründen, sei es, um einen als heilig erachteten Platz zu ehren. Dadurch wuchsen sie allmählich in die Höhe. Die Hauptpyramide von Calakmul, Struktur II genannt, wurde bereits in der Vorklassik, um 400 v. Chr., begonnen. Nachfolgende Herrscher ließen immer größere pyramidenförmige Plattformen hinter dem ursprünglichen Gebäude errichten. Eine große breite Treppe wurde davorgesetzt. So entstand bis ins 9. Jahrhundert n. Chr. die mit ihren 45 Metern Höhe imposanteste Pyramide, die wir heute kennen.




**Die Maya zu Besuch in Hildesheim**

Bedeutende Funde aus dem Staat Calakmul und der Welt der Maya sind bis zum 13. April in der Sonderausstellung »Maya – Könige aus dem Regenwald« im Roemer- und Pelizaeus-Museum Hildesheim zu sehen, darunter zwei der berühmten Jademasken. Nähere Informationen, auch zum Begleitprogramm, finden Sie unter www.maya-ausstellung.de oder erhalten Sie unter 05121 9369-0.

lakmul wusste dies zu nutzen und entwickelte sich zur Supermacht des Maya-Tieflands. König Yuknoom der Große (636–686) überfiel beispielsweise 650 den Ort Dos Pilas, der zu einem treuen Vasallen der Kaan-Dynastie wurde. Auch der wichtige Handelsposten Cancuén geriet unter ihren Einfluss. Während seiner fünfzigjährigen Regentschaft ließ der Herrscher seine Erfolge auf 18 Stelen dokumentieren.

Dass ein besiegter Staat dem eigenen Gebiet einverleibt wurde, war vermutlich eher selten. Lag er nicht weiter als einen Tagesmarsch entfernt, ließ sich eine direkte Kontrolle noch durchführen. Ansonsten aber schwerlich, denn keiner der Staaten verfügte über so große Heere. Zudem existierten kaum befestigte Wege, die eine schnelle Verlegung von Streitkräften in Krisengebiete erlaubt hätten. Tikal profitierte davon offenbar, denn Inschriften in Calakmul berichten, dass König Yuknoom der Große einen Grund gesehen haben muss, den einstigen Feind erneut anzugreifen. Mehr noch: Unter der Führung von Tikals Königs Jasaw Chan K'awiil erstarkte die Stadt wieder und besiegte ihren Erzfeind im Jahr 695. Yich'aak K'ak (zu Deutsch »Feuerklaue«), vermutlich Sohn von Yuknoom dem Großen, wurde geschlagen.

Doch nun kehrten sich die Rollen um. Calakmul war weder vernichtet noch besetzt worden. Im Gegenteil: Ramón Carrasco, Leiter des archäologischen Projekts Calakmul, berichtet, dass in den Jahren nach der Niederlage neue Paläste und Tempel entstanden. Die rege Bautätigkeit lässt den Forscher vermuten, dass die Einwohnerzahl damals sogar ihren Höchststand erreichte. Damit einher ging wohl eine neue Strategie der Kaan-Dynastie: Calakmul engagierte sich verstärkt im Norden Yukatans, wie für dortige Städte typische Stilmerkmale bei der Keramik dieser Zeit verraten. Zwar pflegte das Königreich der Schlange Inschriften zufolge weiterhin diplomatische Beziehungen mit alten Verbündeten wie Dos Pilas, verlor im zentralen Tiefland aber an Einfluss.

Gingen die Erzfeinde einander nun aus dem Weg? Eine Altarinschrift aus Tikal vom Beginn des 8. Jahrhunderts widerspricht dieser Annahme. Sie zeigt das Bildnis des gefangenen Schlangen-Königs Yuknoom Took' K'awiil (zu Deutsch Yuknoom »Feuerstein« K'awiil). Möglicherweise unternahm Tikal einen erneuten Anlauf, Calakmul niederzuringen. Weil aber weitere Bekundungen des Siegs fehlen, gehen die Experten davon aus, dass auch dieses Vorhaben misslang.

Vermutlich hatten die Erzfeinde längst andere Sorgen: Während des 9. und zu Beginn des 10. Jahrhunderts verlor das Gottkönigtum offenbar im gesamten Tiefland an Macht (Spektrum der Wissenschaft 12/2002, S. 38). Es wurden keine Stelen mehr errichtet, Paläste und Tempel verfielen. Die letzte inschriftliche Erwähnung eines Kaan-Herrschers stammt aus dem weit entfernten Ort Seibal, heute in Guatemala, aus dem Jahr 849. Um diese Zeit wurde Calakmul dem archäologischen Befund nach weit gehend verlassen, lediglich einige kleinere Bereiche des Stadtge-

## Vorbereitung zu einem Fest

**Das überraschte sogar Maya-Experten:** Bei der Ausgrabung der so genannten Struktur I, einer aus drei Stufen bestehenden Plattform im Wohnbereich des Adels von Calakmul, entdeckte der Archäologe Ramón Carrasco kürzlich einzigartige Malereien. Der Unterbau, der aus der Frühen Klassik, also der Zeit zwischen 250 und 600 n. Chr. stammt, war mit Stuck überzogen und – das ist das Besondere – mit Malereien verziert. Denn üblicherweise schmückten Fresken nur Innenräume, nicht Außenfassaden. Ungewöhnlich sind auch die Bilder selbst: Sie zeigen Festvorbereitungen, also Szenen aus dem Alltag des Adels, statt der sonst üblichen religiösen oder politischen Darstellungen.

Dieser Ausschnitt präsentiert eine ranghohe Dame in einem durchsichtigen Kleid, Schmuck und Körperbemalung unterstreichen ihren Rang. Für die Farbe des Gewands verwendeten die Künstler das aus einer Indigo-Pflanze gewonnene Maya-Blau.

Kurze Texte verraten sogar, dass Atole, ein Getränk aus Maisbrei, auf den Tisch kam. Ramón Carrasco vermutet, dass der Anlass möglicherweise das Jubiläum einer Thronbesteigung war. Ob auch die anderen beiden Stufen bei dieser Gelegenheit ähnlich geschmückt wurden, sollen kommende archäologische Grabungen klären.

RAMÓN CARRASCO

biets blieben bis um 1000 bewohnt – Bauern hatten sich in den ehemaligen Residenzen des Adels eingerichtet. Rituelle Bedeutung hatten die großen Pyramidentempel offenbar noch bis ins 14. und 15. Jahrhundert hinein, das belegen Spuren von Zeremonien. Tikal wurde letztmalig im Jahr 869 erwähnt, auch dort übernahmen den archäologischen Funden zufolge Bauern die Adelssitze. Die letzte bekannte Stele, mit einem Datum im klassischen Stil, errichtete der König der Stadt Toniná 909 im äußersten Südwesten des Maya-Gebiets. Dieses Monument, von dessen Inschrift leider nur das Datum erhalten ist, markiert das Ende der Königsdynastien.

### Hunger nagt am Gottkönigtum

Das Fehlen weiterer solcher Textquellen erschwert die Diagnose, woran die klassische Maya-Kultur letztlich zu Grunde ging. Ökologische Probleme dürften eine große Rolle gespielt haben. Um die stetig wachsende Bevölkerung zu ernähren, aber auch für die Repräsentationsbauten mussten immer neue Waldflächen abgeholzt werden. Die steinernen Gebäude des Adels waren mit Stuck verputzt, der auf Grund der Witterung immer wieder erneuert werden musste. Um den Grundstoff zu brennen, brauchte man viel Holz. Das Ergebnis: Erosion der ohnehin schon dünnen Humusschicht sowie Absinken des Grundwasserspiegels. Zudem verschlimmerten nach aktuellen Erkenntnissen Dürren als Folge von Klimaänderungen die Versorgungslage (Spektrum der Wissenschaft 1/2006, S. 42).

Konnten die Regierenden ihr Volk nicht mehr ernähren, verloren sie die Legitimation ihrer Herrschaft. Revoltierte nun das Volk in allen Städten? Ohne politische Führung aber wäre die Verteilung lebenswichtiger Güter noch schwieriger geworden, ebenso die Rekrutierung von Arbeitskräften für die Landwirtschaft oder den Bau neuer Wasserspeicher. Das Patt zwischen den angeschlagenen Rivalen Tikal und Calakmul mag die Situation verschärft haben, wie Nikolai Grube, Leiter des Instituts für Altamerikanistik der Universität Bonn, glaubt: Ohne eindeutige Hegemonie entstanden im Tiefland eine Vielzahl neuer Kleinststaaten, deren Königshöfe den großen Vorbildern in Sachen Monumentalbauten in nichts nachstehen wollten und ihre knappen Ressourcen weiter ausbeuteten.

Eine Stadt nach der anderen wurde aufgegeben, während am Rand des Tieflands und im Hochland des heutigen Guatemala neue Kleinstaaten prosperierten; über diese Vorfahren der heutigen Maya wissen wir aber noch wenig. In den einstigen Hochburgen der Klassik gewann der Urwald die Oberhand, erst Mitte des 19. Jahrhunderts entdeckten Forscher und Abenteurer die aus dem Kronendach ragenden Ruinen. Während Touristenmagnete wie Chichén Itzá, Palenque oder Tikal heute bequem mit Bussen erreichbar sind, hat Calakmul die Atmosphäre jener Zeit der Entdecker bewahrt – die Region wurde 1990 zum Naturschutzgebiet erklärt. Der dichte Regenwald dort vermittelt auch heute noch ein Gefühl der Ursprünglichkeit. ◁

Die Altamerikanistin **Inés de Castro** ist Kuratorin der ethnologischen Sammlung des Roemer- und Pelizaeus-Museums in Hildesheim.

Maya. Könige aus dem Regenwald. Von Inés de Castro (Hg.). Katalog zur Ausstellung. Verlag Gebrüder Gerstenberg, Hildesheim 2007

Bericht aus Yucatán. Von Diego de Landa. Reclam-Verlag, Ditzingen 2007

Chronicle of the Maya kings and queens. Deciphering the dynasties of the ancient Maya. Von Simon Martin und Nikolai Grube. London und New York 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/940424.

# Was ist der Mensch?

## Von der biologischen und kulturellen Formbarkeit des Menschen

**Wissenschaftliche Entwicklungen werfen ethische Fragen auf, vor allem dort, wo sie sich unter dem Gesichtspunkt der Machbarkeit auf den Menschen selbst beziehen. Grenzen der Machbarkeit lagen einmal in der Natur; nun liegen sie, als vernünftig bestimmte Grenzen, in uns.**

Von Jürgen Mittelstraß

Es ist noch nicht lange her, dass eine aufgeregte, in vieler Hinsicht reichlich provinzielle Debatte über die neuen Möglichkeiten biologischer Manipulation, das heißt über die interventionistischen Potenziale der neuen Biologie, den Blätterwald der Republik zum Rauschen brachte. Da war, bezogen auf den Menschen, von Züchtung, Selektion, Menschenpark und dessen Regeln die Rede, ferner von Anthropotechniken, das heißt Techniken zur Veredelung des Menschen. Mit denen würde oder sollte der Mensch nunmehr die Regie über sein weiteres Schicksal übernehmen.

Zur Abwehr wurde gelegentlich sogar an die Eugenikprogramme im Nationalsozialismus erinnert. Es kam viel Unausgegorenes zusammen – und nicht wenige Naturwissenschaftler staunten einmal wieder über die eigentümliche Fähigkeit der Geisteswissenschaftler und Philosophen, auf naturwissenschaftliche Entwicklungen und Ergebnisse mit wirrem Zeug zu reagieren. Dabei sollte es doch zunächst einmal darum gehen, zur Kenntnis zu nehmen und nüchtern zu prüfen, was der wissenschaftliche Verstand herausgefunden hat und wohin er sich bewegt.

Eben dies tun denn auch die Solideren unter den Philosophen, und zwar, von unseren Feuilletondenkern souverän übersehen, schon seit Langem. Wo wissenschaftliche Entwicklungen einen ethischen Schatten werfen, hat die Philosophie stets ihre Stimme erhoben. Ethik als philosophische Disziplin ist von Beginn an nicht nur mit den Problemen eines (moralisch) guten Lebens und Bedingungen der Glückseligkeit befasst, wie die Philosophie ganz unbefangen sagt. Sie beschäftigt sich unter anderem mit dem keineswegs einfach zu lösenden Problem, das wissenschaftliche Tun mit vernünftig begründeten Maximen und Imperativen des individuellen und gesellschaftlichen Handelns zur Übereinstimmung zu bringen.

Dazu bedarf es aber auch auf Seiten einer ethischen Reflexion, die das Wissenschaftliche mit dem Leben verbinden soll, kompetenter Einsicht in das wissenschaftliche Tun und großer Erfahrung im Umgang mit wissenschaftlichen Prozessen und Ergebnissen. Eben dies fehlt häufig, wenn sich Philosophen in wissenschaftliche (und andere) Dinge einmischen. Sie versuchen im Hase-und-Igel-Spiel den Igel zu spielen und sind in Wahrheit doch nur der Hase. Der kommt allemal zu spät und übersieht auf der Jagd nach tiefen Einsichten häufig die einfachsten und für die Welt wichtigsten – und seine eingeschränkten Kompetenzen auch.

*Philosophen versuchen häufig im Hase-und-Igel-Spiel den Igel zu spielen und sind doch nur der Hase*

### Die Bioethik der modernen Medizin

Ethik hat heute ihre Anwendungen wiederentdeckt. Als philosophische Ethik in erster Linie mit Prinzipien jeder Form von Moralität befasst, also als Theorie der Moral verstanden, hatte sie sich zuletzt, unter dem Stichwort Metaethik, vornehmlich mit der sprachlichen Analyse moralischer Urteile beschäftigt. Der Weg führte insofern nicht zu Anwendungen, zu einer unter ethischen Gesichtspunkten betrachteten Praxis, sondern im Gegenteil noch weiter von dieser Praxis fort. Es ging und geht in einer metaethischen Betrachtungsweise um die Möglichkeit, sich mit Ethik selbst auf eine wissenschaftliche Weise zu befassen.

Metaethik in diesem Sinne ist selbst ethisch neutral – und damit auch moralisch (in dieser Bedeutung als Anwendungsfall ethischer Urteile) neutral. Mit dieser als Neutralitätsthese bezeichneten Einstellung sucht die philoso-

phische Ethik selbst einen wissenschaftlichen Status zu gewinnen – um den Preis ihres ethischen, damit auch moralischen Gehalts, und das heißt: um den Preis ihrer Anwendungen, ihres Einflusses auf das moralisch beurteilbare oder zu beurteilende Handeln.

Diese Situation hat sich heute verändert. Zwar geht es in der Ethik noch immer um Prinzipien der Moral und um die systematische, auch sprachanalytisch geklärte Rolle derartiger Prinzipien. Doch melden sich dabei zunehmend Probleme zu Wort, die sich nicht so sehr in der philosophischen Analyse selbst, als systematische Fragestellungen, geltend machen als vielmehr in der Praxis, auch in der Praxis einzelner Wissenschaften, als ethische oder moralische Fragen. In diesem Sinne treten sie als empirische Probleme auf, die nach einer Lösung rufen, auch einer solchen, die ihre eigenen systematischen Fragen mit sich führt.

Konkret haben unter dem allgemeinen Rahmentitel einer angewandten Ethik Probleme an Bedeutung gewonnen, die etwa unter den Stichworten Medizinethik, Umweltethik, Technikethik und Wirtschaftsethik behandelt werden. Dabei handelt es sich um Probleme und Fragen, die sich vornehmlich der modernen Wissenschaftsentwicklung verdanken.

Dies gilt insbesondere für die Entwicklung der modernen Medizin und Biologie, weshalb auch zu den genannten Stichworten das Stichwort Bioethik beziehungsweise das einer biomedizinischen Ethik tritt. In ihr geht es um ethische Fragen und Probleme, die im Zuge neuerer wissenschaftlicher Entwicklungen den Bereich des Lebendigen betreffen, also nicht nur humanethische, sondern auch tierethische und ökologische, die auch schon unter dem Stichwort Umweltethik diskutiert wurden. Dabei sind es vor allem Entwicklungen in der Gentechnik und der Reproduktionsmedizin, welche die Bioethik heute zu einem zentralen Thema der ethischen Reflexion machen.

Die philosophische Ethik ist mitten in die wissenschaftliche Entwicklung geraten: nicht, indem sie sich selbst in eine Wissenschaft zu verwandeln sucht, wovon die älteren metaethischen Betrachtungen zeugen. Vielmehr sieht sie sich mit ethischen (und moralischen) Problemen wissenschaftlicher Entwicklungen konfrontiert, welche die Wissenschaft selbst nicht lösen kann und die auch andere gesellschaftliche Instanzen ohne die Anstrengungen einer philosophischen Ethik nicht lösen können. Das wiederum liegt nicht zuletzt daran, dass auf dem Feld der Bioethik, auf den Menschen bezogen, wissenschaftliche, ethische und anthropologische Aspekte ineinandergreifen. Hier geht es nicht um irgendwelche Dinge, die einen ethischen Schatten werfen, sondern um den Menschen selbst, sein Selbstverständnis und seine Zukunft – als biologisches und kulturelles Wesen.

Wir sind heute, kein Zweifel, Zeugen tief greifender Entwicklungen in Biologie und Medizin, aber auch Zeugen einer fundamentalen Veränderung im Verhältnis von Wissenschaft und Anthropologie, im Verhältnis zwischen dem, was wir über die Welt, und dem, was wir über uns selbst wissen. Der forschende Blick geht vom Makrokosmos, den der Mensch mit anderen Wesen bewohnt, hin zum Mikrokosmos, welcher der Mensch selbst ist. Zugleich entdeckt er jene Exzentrizität, die im Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild die neue Stellung des Menschen im Kosmos ausmachte – auf einmal bewohnte er nicht mehr die Mitte, sondern einen Außenposten der Welt: in sich selbst.

## Der Mensch, das nicht festgestellte Wesen

Der Mensch begreift sich, mit Friedrich Nietzsche, als das »noch nicht festgestellte Tier«, wobei auch die Wissenschaft als Ausdruck der Bemühung des Menschen verstanden wird, »sich festzustellen«. Er begreift sich in dieser Form von exzentrischer, keine vorbestimmte Mitte besitzender Existenz mit dem Anthropologen Helmuth Plessner als Einheit von vermittelter Unmittelbarkeit und natürlicher Künstlichkeit. Gemeint ist, dass dem Menschen als reflexivem, denkendem Wesen ein unvermitteltes Verhältnis zu sich selbst nicht möglich und ihm insofern auch sein reflexives, »künstliches« Wesen natürlich ist. In der modernen Biologie findet diese anthropologische Feststellung eine empirische Bestätigung, insofern uns unser wissenschaftliches Wissen zunehmend in die Lage versetzt, uns selbst, unsere biologische Natur nicht nur zu erkennen, sondern auch zu verändern und in diesem Sinne zu »machen«.

Die alte Vorstellung, dass der Mensch im Unterschied zu allen anderen Geschöpfen sein Wesen, gemeint ist sein kulturelles Wesen, selbst bestimmen müsse, macht nicht länger vor seinem biologischen Wesen Halt. Damit öffnet sich ein weiter Horizont möglicher Selbstdeutungen des Menschen und damit auch für die Beantwortung der Frage, was der Mensch ist. Klar ist aber genauso, dass diese Frage nicht abschließend beantwortbar ist und sich die wesentliche Offenheit des Menschen in der Bestimmung dessen, was sein Wesen ist, als die eigentliche anthropologische Grundsituation des Menschen bezeichnen lässt. Diese Grundsituation des Menschen besteht eben darin, in seinem Wesen nicht – wie das Tier – festgelegt zu sein, sondern dieses

*Die Vorstellung, dass der Mensch sein Wesen selbst bestimmen müsse, macht nicht länger vor seiner Biologie Halt*

Wesen selbst zu bestimmen, was in jedem Einzelfall auch bedeutet: sich selbst zu bestimmen. Selbstbestimmung ist nicht zufällig das Losungswort der Aufklärung. Es stellt den Menschen vor seine eigentliche Grundsituation und weist ihm den Weg, mit dieser Situation fertig zu werden.

Noch mal anders formuliert: Der Mensch ist ein Naturwesen, das nur als Kulturwesen leben kann und nur als Kulturwesen seine Bestimmung findet. Darum vermag auch nur er selbst zu bestimmen, was sein Wesen sein soll. Nichts anderes besagt die viel gescholtene Bemerkung des Konstanzer Biologen Hubert Markl. Der damalige Präsident der Max-Planck-Gesellschaft hatte in der öffentlichen Debatte über biomedizinische und bioethische Fragen geäußert, dass »Mensch« ein »kulturbezogener Zuschreibungsbegriff von Menschen« sei und »keine rein biologische Tatsache«. »Menschsein ist mehr als dies Faktum, es ist eine kulturell-sozial begründete Attribution.«

Das soll heißen: Was der Mensch in seinem Wesen ist, lässt sich nicht einfach empirisch ermitteln – etwa so wie wir die Eigenschaften eines Insekts oder das Wahlverhalten von Bevölkerungsteilen ermitteln. Was der Mensch in seinem Wesen darstellt, ist vielmehr das Resultat unseres Nachdenkens über den Menschen, also über uns selbst, und es sind anthropologische Schlüsse, die wir aus einem solchen Nachdenken ziehen, zum Beispiel in moralischer oder in Verfassungsform.

In der Auseinandersetzung mit solchen Feststellungen wurde diese Beurteilung seltsamerweise als unerlaubter Übergriff des biologischen Verstands auf den anthropologischen, wie es auch heißt, die Ethik verwaltenden Verstands diagnostiziert – offenbar nur, weil es ein Biologe gesagt hat. Das wiederum zeigt nur, dass gewisse Selbstverständlichkeiten, welche die philosophische Anthropologie von jeher dargelegt hat – darunter diejenige, dass der Mensch sein Wesen selbst bestimmen müsse –, als solche nicht mehr gesehen werden. Es zeigt ferner, dass sich im öffentlichen Bewusstsein und seinen Medien zwei Kulturen, die naturwissenschaftliche und die geisteswissenschaftliche, doch weiter auseinanderentwickelt haben, als dies für eine rationale Kultur bekömmlich ist, die auf den forschenden Verstand ebenso setzt wie auf die reflektierende Vernunft.

In der biologischen Systematik, und insofern deskriptiv, ist der heutige Mensch eine Unterart der Art *Homo sapiens*, nämlich *Homo sapiens sapiens*, und das einzige überlebende Mitglied der Gattung *Homo*. Doch ist mit dieser Bestimmung eben nur die empirisch-physische Seite des Menschen erfasst, nicht das, was askriptiv das Wesen des Menschen ausmacht, nämlich in Form einer Selbstzuschreibung und einer – nicht abschließend festlegbaren – Selbstbestimmung. Dieses Wesen beschrieben denn auch die Alten entweder in Form des *animal rationale*, eines vernunftbegabten und durch die Vernunft bestimmten Lebewesens, oder in Form eines Wesens zwischen Tier und Gott. Neuere Anthropologien, wie die von Nietzsche, fassen es im Begriff des (biologisch wie kulturell) nicht festgestellten Wesens. Wir machen eben einen Kategorienfehler, wenn wir unser Tun und Denken als Ausdruck natürlicher Prozesse deuten, womit im Übrigen auch das Deuten selbst zur Natur, zu einem natürlichen Faktum würde. Wir fallen allerdings auch in eine neue Naivität zurück, wenn wir entgegen dieser Auffassung meinen sollten, naturwissenschaftlich erhobene Fakten hätten keinerlei Einfluss oder sollten keinerlei Einfluss haben auf die Selbstbestimmung des Menschen in seinem Wesen. Es kommt eben darauf an, jenseits von Biologismus und Kulturalismus, das heißt jenseits einer Absolutsetzung entweder biologischer Erklärungen oder kultureller Erklärungen, die sich auf das Leben und die Gesetze, unter die das Leben tritt, beziehen, wieder eine wissenschaftlich informierte und philosophisch reflektierte Position einzunehmen, die den Menschen nicht auf das reduziert, was er als pure Natur ist oder als absoluter Geist sein will.

## Vernunft, Person, Würde

Vieles spricht tatsächlich dafür, dass hinter der heftigen Debatte um den wissenschaftlichen Fortschritt im Kontext von Biologie, Medizin und Ethik die Pseudoalternative von Biologismus und Kulturalismus sowie der Wunsch zur Vereinfachung in der einen oder in der anderen Richtung stehen. Die einen sehen im biologischen Fortschritt sowie seinen medizinischen und gesellschaftlichen Implikationen eine fundamentale Bedrohung des Menschseins überhaupt. Die anderen vermuten in einer wissenschaftsfernen, hier biologiefernen Bestimmung des Wesens des Menschen eine neue (oder alte) Herrschaftsform des geisteswissenschaftlichen und des theologischen Verstands über den naturwissenschaftlichen Verstand. Dabei geht es insbesondere um den Begriff der Menschenwürde.

Einer langen anthropologischen Tradition folgend sind für den Begriff der Menschenwürde die Begriffe Person und Vernunft konstitutiv. Im Begriff der Person versuchen wir in askriptiver Weise, also in Form einer wohlüberlegten zuschreibenden Bestimmung des Menschen, die Gesichtspunkte der Identität und der Autonomie des Menschen zusammenzufas-

**Literaturtipps**

Freiheit, Verantwortung, Menschenwürde: Warum Lebenswissenschaften mehr sind als Biologie. Von H. Markl in: 52. Jahresversammlung der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin 2001. Max-Planck-Gesellschaft (Hg.). München 2001, S. 58

Der Mensch wird geboren. Kleine Apologie der Humanität. Von V. Gerhardt. C.H.Beck, München 2001, S. 74

Zur Unterscheidung zwischen »deskriptiv« und »askriptiv«: Praktische Subjektivität und Spezies. Von C. F. Gethmann in: Subjektivität. Von W. Hogrebe (Hg.). Fink, München 1988, S. 138

Die Stufen des Organischen und der Mensch. Einleitung in die philosophische Anthropologie. Von H. Plessner in: Gesammelte Schriften IV. Suhrkamp, Frankfurt/Main 1981, S. 360

Nachgelassene Fragmente Frühjahr 1881 bis Sommer 1882. Von F. Nietzsche, in: Werke. Kritische Gesamtausgabe V/2. Von G. Colli, M. Montinari (Hg.). De Gruyter, Berlin 1973, S. 533

Jenseits von Gut und Böse (1886). Von F. Nietzsche, in: Werke. Kritische Gesamtausgabe VI/2. Berlin 1968, S. 79

Grundlegung zur Metaphysik der Sitten (1785). Von I. Kant, in: Gesammelte Schriften. Von Königlich Preussische (heute Berlin-Brandenburgische) Akademie der Wissenschaften (Hg.). Berlin 1902 IV, S. 434

Toward a New Philosophy of Biology. Observations of an Evolutionist. Von E. Mayr. Cambridge, Mass./London 1988, S. 89, (dt.: Eine neue Philosophie der Biologie. Piper, München/Zürich 1991, S. 118)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/940428.

sen. Deshalb auch die Rede von einer personalen Identität und einer personalen Autonomie. Identität meint hier nicht die empirische Einheit des Menschen mit sich selbst – etwa über biologische Merkmale bestimmbar –, sondern eine begriffliche Einheit, nämlich die eines vernünftigen Wesens. Autonomie wiederum bezieht sich auf die Fähigkeit zu einem selbstbestimmten, sich seine Ziele selbst setzenden beziehungsweise diese realisierenden Handeln. Daher verbinden sich auch die Begriffe Person, Vernunft und Würde miteinander, etwa in der Zwecke-Formel des Kategorischen Imperativs zur Bestimmung dessen, was Kant die »Würde eines vernünftigen Wesens« nennt.

Diese Formel lautet: »Handle so, dass du die Menschheit sowohl in deiner Person als in der Person eines jeden andern jederzeit zugleich als Zweck, niemals bloß als Mittel brauchst.« Als »Zweck an sich selbst« existiert nur das vernünftige Wesen, weshalb nach Kant auch nur das vernünftige Wesen Würde hat. Damit ist für Kant klar: Dem Menschen kommt nicht bereits als Mitglied der Gattung Mensch, also im Rahmen einer allein biologischen Systematik, sondern erst als Träger von Vernunft beziehungsweise im Hinblick auf seine Vernünftigkeit, also im Rahmen einer kulturellen Systematik, Würde zu.

Natürlich ergeben sich aus diesem Zusammenhang Schwierigkeiten. So etwa, wenn man den Schutz des Menschen vor Fremdbestimmung, der auch heute mit dem Würdeargument begründet wird, auf Vorstufen eines entwickelten Vernunftwesens ausdehnt, wie auf die befruchtete Eizelle, aber auch auf spätere Eingriffe jeder Art in die genetische Identität des Menschen. Hier drohen deskriptive (biologische) Aspekte – der Mensch als biologische Gattung – und askriptive (anthropologische) Aspekte – das »Wesen« des Menschen – wieder durcheinanderzugeraten, etwa dort, wo zwischen einer Fremdbestimmung, die sich gegen Selbstbestimmung richtet (der Normalfall in unserem Erwachsenenleben), und einer Fremdbestimmung, die – wie im Fall des Embryos – auf nicht selbst bestimmte Verhältnisse trifft, nicht unterschieden wird.

Wie polemisch und sachlich unbedacht im Übrigen etwa Debatten um den Anfang des menschlichen Lebens und dessen Schutz geführt werden, macht der Umstand deutlich, dass hier der Hinweis, bei differenzierterer Betrachtung des Begriffs der Menschenwürde stünde auch die Würde geistig Behinderter, Alzheimer- und Wachkomapatienten in Frage, nicht auf sich warten ließ. Als ob sich zwischen kranken Menschen und einer befruchteten Eizelle vor der Einnistung nicht unterscheiden ließe, und als ob sich in einer Gesellschaft und einem Rechtssystem, in dem das Eigentum, der letzte Wille Verstorbener, Autorenrechte oder Patente wirkungsvoll geschützt werden, nicht auch das entstehende menschliche Leben schützen ließe, ohne gleich mit dem Begriff der Menschenwürde zu operieren, der scheinbar keinen Einwand mehr duldet. Dieser Schutz wird durchaus in differenzierter Weise erfolgen können, und zwar bei Anfang und bei Ende des Lebens: vor der Geburt und vor dem Tod (Stichwort Sterbehilfe).

## »Erkenne dich selbst!«

Wenn es – noch einmal auf das Stichwort Ethik zurückkommend – unter kontingenten, also historischen Umständen immer wieder darum geht, unser Wissen und Tun miteinander in Einklang zu bringen, dann bedeutet das auch, Wissenschaft und Ethik nicht als zwei unterschiedliche Welten zu betrachten, allerdings nicht, sie beispielsweise in Form einer biologischen Ethik miteinander zu identifizieren. Biologie kann sich nicht an die Stelle der Ethik setzen, aber sie leistet einen wesentlichen Beitrag zur Klärung gewisser Voraussetzungen einer Ethik.

So konstatiert auch der Evolutionsbiologe Ernst Mayr: »Die Evolution stattet uns nicht mit einem vollständigen, kodifizierten Satz ethischer Normen aus, wie es etwa die Zehn Gebote sind. Ein Verständnis der Evolution vermittelt uns jedoch eine Weltsicht, die als vernünftige Ausgangsbasis zur Entwicklung eines ethischen Systems dienen kann, das sich für die Aufrechterhaltung einer gesunden menschlichen Gesellschaft eignet und auch für die Zukunft der Menschheit in einer Welt Sorge trägt, die durch den Schutz des Menschen vor der Zerstörung bewahrt wird.«

Wissenschaftliche Tatbestände müssen auch in der Ethik zur Kenntnis genommen und berücksichtigt werden, allerdings stets eingedenk der philosophischen Tatsache, dass aus Sein kein Sollen folgt. Jeglicher Naturalismus in der Ethik hindert sie gerade daran, ihre eigentliche Aufgabe zu erfüllen, nämlich das Leben vernünftig zu orientieren. Über dem Eingang des Apollontempels in Delphi steht eingemeißelt: »Erkenne dich selbst!« Dieser Aufforderung ist eben nicht schon Folge geleistet, wenn wir erkannt haben, was an uns selbst Natur ist.

Es kommt darauf an, mit dieser Natur, in uns und außer uns, vernünftig umzugehen, und das heißt, die rechte Balance zwischen Tun und Lassen, auch im Hinblick auf den wissenschaftlichen Fortschritt, immer wieder aufs Neue zu finden. Grenzen der Machbarkeit lagen einmal in der Natur; nun liegen sie, als vernünftig bestimmte Grenzen, in uns. ◁

*Biologie kann sich nicht an die Stelle der Ethik setzen, klärt aber gewisse Voraussetzungen einer Ethik*

**Jürgen Mittelstraß** studierte von 1956 bis 1961 Philosophie, Germanistik und evangelische Theologie in Bonn, Erlangen, Hamburg und Oxford. Promotion 1961 und Habilitation 1968 an der Universität Erlangen. Von 1970 bis 2005 war er Professor für Philosophie und Wissenschaftstheorie an der Universität Konstanz, seit 1990 zugleich auch Direktor des Zentrums Philosophie und Wissenschaftstheorie. Mittelstraß ist Herausgeber der »Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie«. Der Beitrag ist die gekürzte Fassung eines Vortrags, den er 2007 am Heidelberger MPI für Medizinische Forschung hielt.

JAHR DER MATHEMATIK

# Es gibt mehr Mathe, als du denkst

ZUM JAHR DER MATHE-MATIK

Zum Jahr der Mathematik 2008 erwartet uns ein bunter Blumenstrauß aus Ausstellungen, Vorträgen, Wettbewerben und öffentlichen Events.

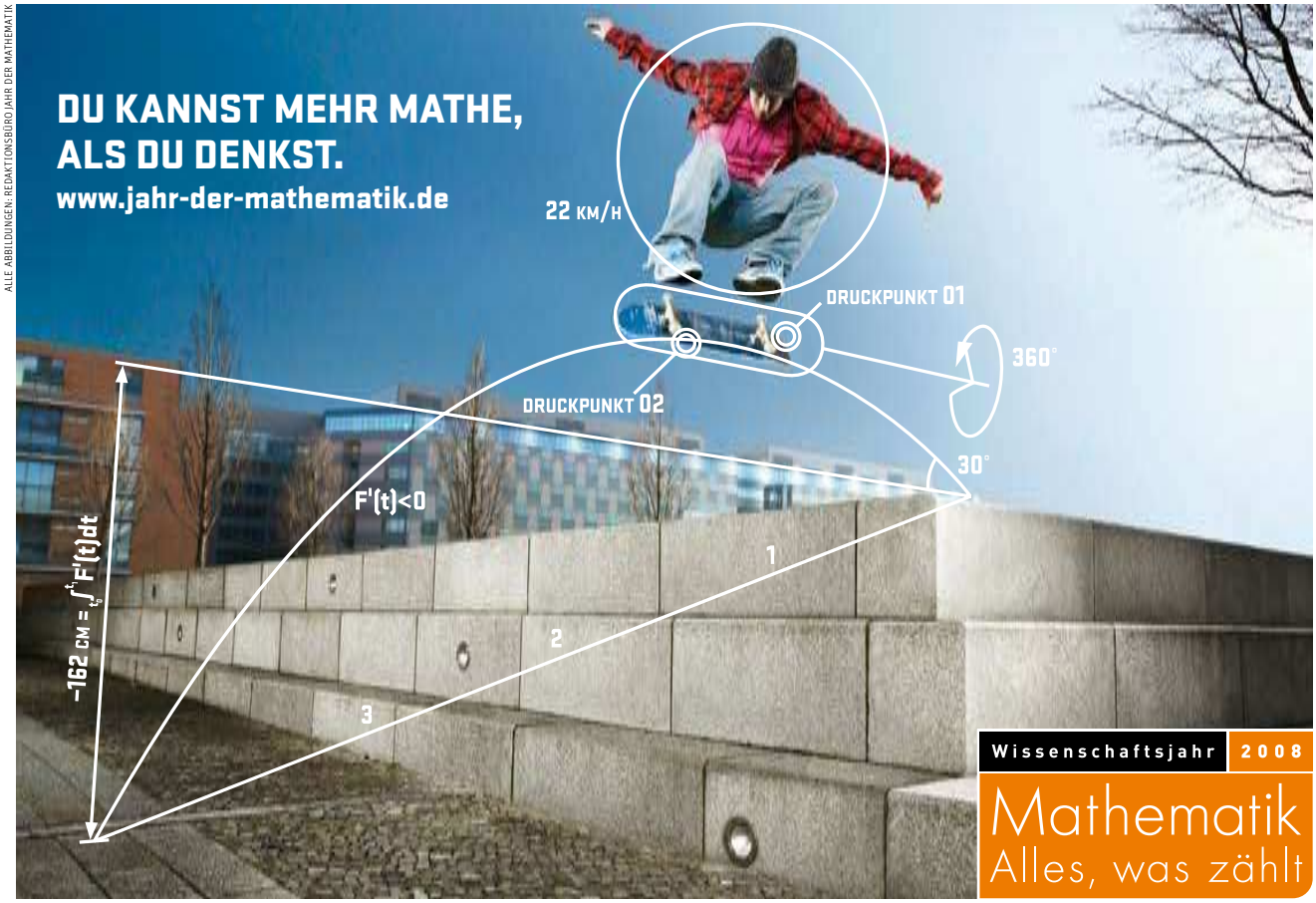
Von Christoph Pöppe

Unter den Wissenschaftsjahren, die das Bundesministerium für Bildung und Forschung seit neun Jahren ausrichtet, ist diesmal die Mathematik an der Reihe, sozusagen von Amts wegen gefeiert und ins öffentliche Bewusstsein gerückt zu werden. Am 23. Januar war feierliche Eröffnung in Berlin. Und sie hat es unzweifelhaft bitter nötig.

Über mangelnden Respekt können sich das Fach und seine Vertreter nicht beklagen. Man weiß, dass die ganze Naturwissenschaft von der Mathematik lebt und dass ihre wesentlichen Erkenntnisse in Form mathematischer Gleichungen ausgedrückt werden. Auch dass der allgegenwärtige Computer im Grunde seines Herzens ein Mathematikgerät ist, hat sich einigermaßen herumgesprochen.

Aber Respekt und Zuneigung sind zweierlei. Abstrakt, weltabgewandt, nur Genies und/oder Verrückten zugänglich, auf jeden Fall mit großer Mühe verbunden, Trauma frustrierender Schulstunden – diese wahrgenommenen Eigenschaften der Mathematik erwecken nicht gerade Liebe auf den ersten Blick. Die Schöne will mit einer gewissen Anstrengung erobert werden. Dass die Sache trotzdem Spaß machen kann, und zwar auch dem, der sich nicht zu ihren intimen Freunden zählen darf, ist weniger bekannt.

Für PR-Maßnahmen zur Mathematik gibt es daher ausreichend Motive, auch die staatstragenden, die naturgemäß für die öffentlichen Geldgeber im Vordergrund stehen: Wie soll die technologische Spitzenstellung Deutschlands gewahrt oder gar fortentwickelt werden,




ALLE ABBILDUNGEN: REDAKTIONSBÜRO JAHR DER MATHEMATIK

wenn deren wissenschaftliche Grundlage beim lernenden Nachwuchs in solchem Ausmaß Ekel erregt?

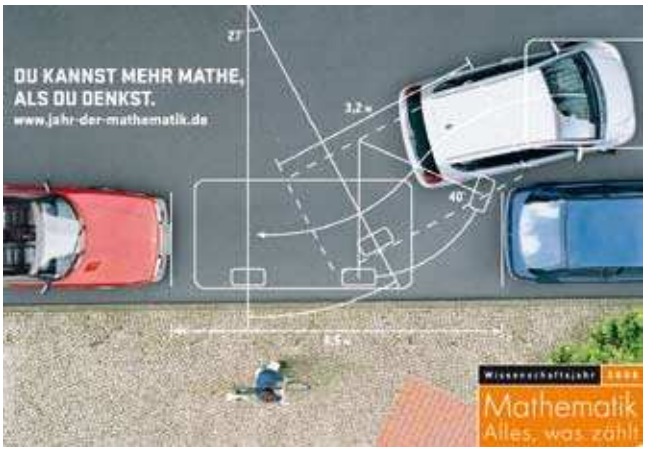
Deutlicher als in den bisherigen Wissenschaftsjahren richten sich diesmal daher die Aktivitäten vorrangig an Kinder und Jugendliche. In Gestalt der Telekom-Stiftung hat das Jahr der Mathematik einen zusätzlichen Förderer gefunden. Auf die fünf Millionen Euro vom Ministerium legt die Stiftung noch zwei Millionen drauf, die nicht ganz so streng nach den offiziellen Vergaberichtlinien ausgegeben werden müssen.

Die vier Träger – außer den beiden Hauptgeldgebern die Initiative »Wissenschaft im Dialog« und die Deutsche Mathematiker-Vereinigung – haben sich dafür entschieden, vorrangig nicht neue Strukturen zu schaffen – die über das Jahr hinaus dann nicht unbedingt Bestand hätten –, sondern bestehende zu unterstützen. So verzichtet man darauf, den drei gut etablierten Wettbewerben Känguru der Mathematik, Mathematik-Olympiade und Bundeswettbewerb Mathematik noch einen vierten hinzuzufügen. Ein Aufruf zur Sammlung von Graswurzelaktivitäten (»Mathemacher werden«) brachte bereits stolze 300 Meldungen, in der Mehrheit Lehrer, die ihren Schüler ungewöhnliche Mathematik-Erlebnisse verschaffen wollen.

Die Ausstellung »Imaginary 2008« mit mathematischen Visualisierungen wandert bereits durch Deutschland (und wird im Aprilheft ausführlicher vorgestellt werden). Seit dem 1. Februar ist im Heinz Nixdorf MuseumsForum in Paderborn die Sonderausstellung »Zahlen, bitte! Die wunderbare Welt von null bis unendlich« zu sehen. Am 7. November wird im Deutschen Technikmuseum Berlin die Ausstellung »Mathema – Ist Mathematik die Sprache der Natur?« eröffnet.

Wird in diesem Jahr nun ein Ruck durchs Land gehen und die Begeisterung für die Mathematik die Schulen überfluten? Die Veranstalter sind realistisch genug, derartige Visionen gar nicht erst zu hegen. Die allgemeine Abneigung gegen die Schulmathematik ist ein sich selbst erhaltendes Phänomen. Mit aller gebotenen Vorsicht – man will ja die vielen en-

**Randwertproblem für eine gewöhnliche Differenzialgleichung (links): Im Absprungpunkt muss der Skater seinem Brett und sich selbst genau den Impuls geben, der das Brett um ungefähr 360 Grad rotieren und beide heil unten aufkommen lässt. Der Höhenunterschied von 162 Zentimetern verschafft dem Gesamtsystem zusätzliche Bewegungsenergie. Rechts: Der Walkman setzt 44 000 Zahlenwerte pro Sekunde in Musik um, aber die stehen nicht alle auf der CD. Zur Platzersparnis werden die Daten komprimiert; hier gezeigt ist eine einfache Lauflängen*(run length)*-Kompression: Aus elf Achten wird die Folge 255 11 8.**



**Einparken ist, von oben gesehen, nichts weiter als eine klassische geometrische Konstruktionsaufgabe (oben rechts). Thomas Fink und Yong Mao haben alle denkbaren Aktionsfolgen beim Krawattenbinden kombinatorisch untersucht (oben links; siehe auch Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 113). Das Zweipunkt-Randwertproblem (links) hat als Lösung die klassische Wurfparabel und ist daher mit Schulmitteln zugänglich, da man in guter Näherung die Papierkugel als punktförmig auffassen kann.**

gagierten Lehrer nicht beschimpfen – zeichnen die Redner bei der Eröffnungspressekonferenz am 23. Januar ein düsteres Bild: Lehrer werden vornehmlich diejenigen, die sich selbst als zu schwach für eine »richtige« Wissenschaftlerlaufbahn empfinden; im Studium gelten sie dementsprechend als zweitklassig, nerven ihre Schüler mit demselben Unterricht, der ihnen schon damals den Spaß verdorben hat, und neigen nicht dazu, ihre angejahrten Kenntnisse durch Fortbildung aufzubessern.

Ein Pilotprojekt der Professoren Albrecht Beutelspacher aus Gießen und Rainer Danckwerts aus Siegen unternimmt es, diesen Kreislauf durch ein neues Konzept der Lehrerausbildung zu durchbrechen – gefördert von der Telekom-Stiftung und nicht auf das Jahr 2008 beschränkt, denn zum Gelingen braucht das Projekt nicht nur Erfolge, sondern auch den Segen der zuständigen Ministerien in Wiesbaden, Düsseldorf und langfristig dem Rest der Republik. Das dauert eine Weile. In einigen Jahren sollten sich erste Wirkungen in den Schulen bemerkbar machen – eine recht optimistische Prognose.

Was sagen nun die abgebildeten Kampagnenmotive der Zielgruppe? Mathematik ist überall, auch da, wo du es gar nicht gedacht hättest. Stimmt; an weiteren Beispielen pflegt man unter anderem die Fahrplansteuerung im Nah- und Fernverkehr, den Entwurf von strömungsgünstigen Flugzeug- und Autoformen und den Nutzen der Kryptografie für die sichere und vertrauliche Informationsübertragung anzuführen.

Insofern Mathematik nützlich ist, bringt sie ihrem Konsumenten also auch Spaß. Aber Vorsicht: Es ist nicht der Spaß an der Mathematik selbst! Den gibt es auch: Zu entdecken, dass hinter Dingen, die anscheinend nichts miteinander zu tun haben, dieselbe abstrakte Struktur steckt, oder einfache und komplizierte Symmetrien zu sehen erfordert noch nicht einmal besondere Vorbildung. Wer darüber hinaus zum Beispiel mit den Bauklötzen der Algebra zu spielen gelernt hat, baut daraus abstrakte Türme von ganz besonderem Reiz – der sich nicht auf eine exotische Randgruppe beschränkt, wie die hohen Teilnehmerzahlen bei allerlei Wettbewerben zeigen.

Spaß haben kann man schon an relativ einfacher Mathematik. »Einfach« heißt in diesem Fall unweigerlich abstrakt und anwendungsfern, also gerade nicht nützlich. Aber das tut dem Spaß keinen Abbruch. ◁

AUTOR

**Christoph Pöppe** ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/940434.



AUF DEN NÄCHSTEN SEITEN FOLGT EINE SONDERPUBLIKATION MIT DER INITIATIVE SACHEN MACHEN ››››

1958

In dieser Unterdruckkammer lässt sich der Ernstfall erproben.

## Trockenkurs für Weltraumfahrer!

»Im Auftrag der US-Luftwaffe wurde eine Unterdruckkammer geschaffen, in der atmosphärische Bedingungen, wie sie in Höhen von 150 km herrschen, geschaffen werden können. Durch ein großes Bullauge kann man beobachten, wie sich die freiwilligen Versuchskaninchen (auf unserem Bild der Wissenschaftler Niels Jensen) im Schutze von Raumanzügen unter diesen außergewöhnlichen Bedingungen verhalten. Wie man sieht, ist der kühne Forscher auch in 150 km Höhe noch völlig Herr seiner Bewegungen, fühlt sich wohlauf und vermag noch schwierige technische Aufgaben auszuführen.« *hobby, Jg. 6, Nr. 3, S. 56*

## Wie groß ist das Neutron?

»Durch Messung der Streuung von 650 meV-Elektronen aus dem Linearbeschleuniger der Stanford University an Schwerem Wasserstoff und Vergleich der Meßergebnisse mit den für die Elektronenstreuung an leichtem Wasserstoff bekannten Werten konnte Robert Hofstadter kürzlich die Größe des Neutrons feststellen. Aus der Differenz der Meßwerte für die Streuung an beiden Medien errechnete er den Radius des Neutrons zu $8 \times 10^{-14}$ Zentimeter. Dieses Ergebnis ist in zweifacher Hinsicht bemerkenswert: Denn einmal stimmt die Größe des Neutrons innerhalb der erzielten Meßgenauigkeit mit der des Protons überein, und zum anderen wurde das Neutron, weil eben elektrisch neutral, als ›gestaltlos‹ und somit ›größenlos‹ angenommen.« *Chemiker-Zeitung, Jg. 82, Nr. 5, S. 150, 5. März 1958*

## Explorer auf Entdeckungsreise

»Auf dem Versuchsgelände von Cape Canaveral wurde am 31. Januar 1958 um 22 Uhr 48 Min. Ortszeit erfolgreich eine Rakete ›Jupiter-C‹ mit dem ersten amerikanischen künstlichen Erdsatelliten abgeschossen … Der amerikanische Satellit enthält vier laufend registrierende Meßinstrumente, so werden überwacht die Außentemperatur, die Innentemperatur, der Anfall an kosmischem Staub und die Intensität einfallender kosmischer Strahlen … Je nach Höhe und Lage der Satellitenbahn schwankt die Außentemperatur zwischen plus 300 Grad und minus 100 Grad Celsius.« *Naturwissenschaftliche Rundschau, Jg. 11, Heft 3, S. 102, März 1958*

---

## Die Sonne als neue Energiequelle

»Würde es uns gelingen, die von der Sonne uns gelieferte Wärmemenge zur Heizung von Dampfkesseln zu verwenden, so wäre ein großer Schritt vorwärts getan. Wir könnten uns dann von der Kohle … emanzipieren … Tatsächlich haben sich mit der Lösung dieses Problems bereits zahlreiche Erfinder … beschäftigt. Zu diesen gesellte sich in neuerer Zeit Tesla. Derselbe konzentrierte die Sonnenstrahlen mittelst Linsen und Hohlspiegel auf das Innere eines dickwandigen Kessels aus Glas. In diesem Kessel befindet sich eine verdampfbare Flüssigkeit … Durch die Wärme der Sonnenstrahlen wird nun die Flüssigkeit derart erhitzt, dass eine Verdampfung derselben erfolgt. Der erzeugte Dampf dient zum Antriebe einer Dampfmaschine.« *Central-Zeitung für Optik und Mechanik, Jg. 29, Nr. 5, S. 60, 1. März 1908*

## Die Farbvorlieben der Hühner

»Auf einem mit schwarzem Tuch bespannten Tische wurden Reis- und Weizenkörner ausgestreut und mit Hilfe einer Bogenlampe ein Spektrum über die Fläche geworfen. Die Hühner … nahmen zuerst die in dem roten und gelben Teile liegenden Körner und wandten sich erst dann zu den gelbgrünen und grünen. Die blauen und die violetten Körner aber und zum Teil auch die blaugrünen blieben unbeachtet und wurden auch nach längerer Hungerzeit nicht berührt. In dem Körnerstreif entstand dabei eine scharf begrenzte schwarze Lücke, die genau mit der Grenze des Spektrums am roten Ende für unser Auge zusammenfällt und auf der anderen Seite vom Grünblau flankiert ist.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Jg. 1908, Nr. 48, S. 383, 31. März 1908*

## Per pedes durch die Themse

»Ein Londoner Schneidermeister hat sich eine Kleidung erdacht, die es ihm ermöglicht, im Wasser zu gehen, und hat seine Erfindung wiederholt in der Themse erprobt … Soll der Körper lotrecht im Wasser stehen, ohne tiefer als bis an die Brust einzusinken, so muß er an den Beinen beschwert und am Oberkörper mit großem Auftriebe versehen werden. Deshalb bekleidet der Erfinder seine Unterschenkel mit metallenen Gamaschen von je 10 kg Gewicht, zieht aber einen Rock an, der zwischen Stoff und Futter wie ein Rettungsgürtel mit Luft gefüllt ist … Die beiden Gamaschen sind mit kupfernen Flügeln versehen, die sich abwechselnd öffnen und schließen, so daß man durch die Wellen schreitet wie der Götterbote Hermes durch die Lüfte.« *Das Neue Universum, Bd. 29, S. 58, 1908*

1908

Eine spezielle Ausrüstung ermöglicht den aufrechten Gang in Wasser.

# STAUFREI FAHREN AUF DER DATENAUTOBAHN

Bits sind keine Autos. Deswegen müssen sie auf der Datenautobahn auch nicht Schlange stehen. Statt zwei Nachrichten aufeinander warten zu lassen, vermischt man sie zu einer einzigen. Aus unterschiedlichen Mischungen kann der Empfänger die ursprüngliche Nachricht rekonstruieren.

Von Michelle Effros, Ralf Kötter und Muriel Médard

Noch heute lebt die Funktion der modernen Kommunikationssysteme von der revolutionären Erkenntnis des Ingenieurs und Mathematikers Claude E. Shannon (1916–2001). Wir kennen seine 1948 veröffentlichte »Mathematische Theorie der Kommunikation« als Informationstheorie. Aus ihr sind die Verfahren zur Kompression und zuverlässigen Übertragung von Daten hervorgegangen, die heute im Internet, bei Festnetz- und Mobilfunktelefonie sowie bei Speichermedien, über Festplatten bis hin zu CDs, DVDs und Flash-Speicherkarten, durchgängig Anwendung finden.

Shannons typischer Übertragungskanal hatte, wie eine klassische Telefonleitung, nur einen Sender und einen Empfänger. Heute fließt Information (beispielsweise im Internet) jedoch zunehmend auf Wegen, die von mehreren Datenströmen zugleich genutzt werden – seien es Kabel, Glasfaserleitungen oder drahtlose Funksysteme. Dadurch werden im Idealfall die teuren Leitungen besser ausgenutzt; andererseits geraten die Nutzer auch in Kon-

kurrenz zueinander, etwa beim Zugriff auf eine Mobilfunk-Basisstation oder auf einen Server, der ein Musikstück zum Download anbietet.

In dieser Situation geht es darum, die knappe Ressource möglichst gerecht und vor allem reibungslos unter den Anwärtern aufzuteilen; den Eltern kleiner Kinder dürfte das Problem bekannt vorkommen. Eine Lösungsmöglichkeit besteht darin, noch mehr Schokolade beziehungsweise Kupfer-, Koaxial- und Glasfaserkabel herbeizuschaffen; aber Letztere zu verlegen ist teuer, und die Netze neu zu knüpfen ist schwierig. Es gibt auch Möglichkeiten, die Übertragungskapazität drahtloser Netze zu erhöhen; nur kann es durchaus sein, dass alle diese Maßnahmen mit dem ständig wachsenden Appetit der Kunden nicht Schritt halten. Neben dem Ausbau der Verbindungshardware werden also Verfahren zur weiteren Steigerung der Effizienz dringend benötigt.

## Nachrichten vermischen und wieder entmischen

Im Internet und anderen gemeinsam genutzten Netzen sitzen an den Knoten des Netzes so genannte Router, Vermittlungsrechner, die jede eingehende Nachricht an einen Knoten weiterleiten, der dem Ziel näher liegt, und sie zwischenlagern, wenn gerade keine geeignete Leitung frei ist. Das Verfahren ist so einleuchtend, dass bis vor wenigen Jahren kaum jemand ernsthaft über eine Alternative nachdachte.

Im Jahr 2000 jedoch veröffentlichte Rudolf Ahlswede von der Universität Bielefeld zusammen mit Ning Cai, Shuo-Yen Robert Li und Raymond W. Yeung, damals alle an der Universität Hong Kong, einen völlig neuen Ansatz zur Lösung des Problems: die so genannte Netzwerkkodierung *(network coding)*. An die Stelle der Router treten »Coder«; diese übertragen statt einer Nachricht lediglich gewisse Auskünfte (»Indizien«) über die Nachricht. Aus den gesammelten Indizien kann der Empfänger die vollständige Nachricht rekonstruieren.

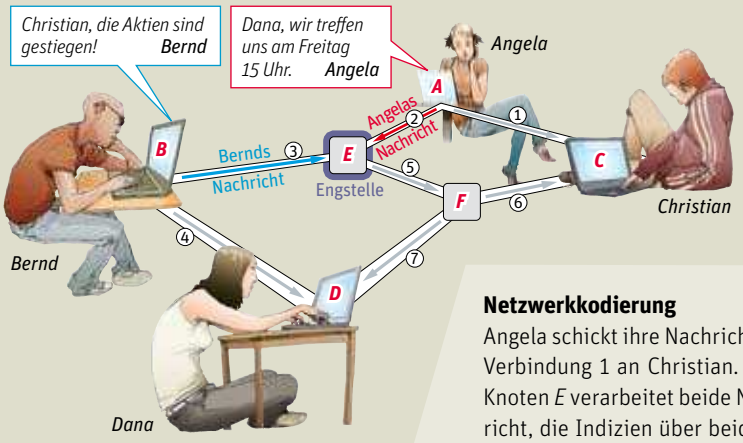
Das klingt – zugegeben – zunächst nicht besonders einleuchtend. Gleichwohl hat die Netzwerkkodierung, die zurzeit noch Gegenstand der Forschung ist, das Potenzial, die Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit jeglicher Art von Kommunikationssystem drastisch zu erhöhen und die nächste Revolution auf diesem Gebiet auszulösen. Soweit wir wissen, ist sie auch die einzige grundlegend neue Idee,

**Der tägliche wilde Datenverkehr aus E-Mails, Internetabrufen, Downloads von Bildern und Videos wird möglicherweise viel störungsfreier laufen – wenn die Netzwerkkodierung sich durchsetzt.**

während alle anderen sich darauf beschränken, bestehende Verfahren fortzuentwickeln.

Die Idee, an Stelle der Daten selbst gewisse Informationen über diese Daten zu übertragen – denken wir an Auszüge oder Zusammenfassungen, den Rotanteil eines Farbbilds oder Ähnliches –, stammt bereits von Shannon. Ahlswede und seine Kollegen haben sie allerdings in einem neuen Kontext angewandt. Sowie der Empfänger genug von diesen »Indizien« *(clues)* beisammenhat, kann er die Nachricht daraus rekonstruieren. Dabei muss er gar nicht alle je ausgesandten Indizien empfangen haben; der Sender produziert und versendet seine Auszüge so reichlich, dass bereits eine Teilmenge von ihnen zur Rekonstruktion genügt. Das Verfahren setzt natürlich voraus, dass der Empfänger die Regel, nach der ein Auszug erstellt wird, kennt oder dem Auszug entnehmen kann.

## Das Prinzip

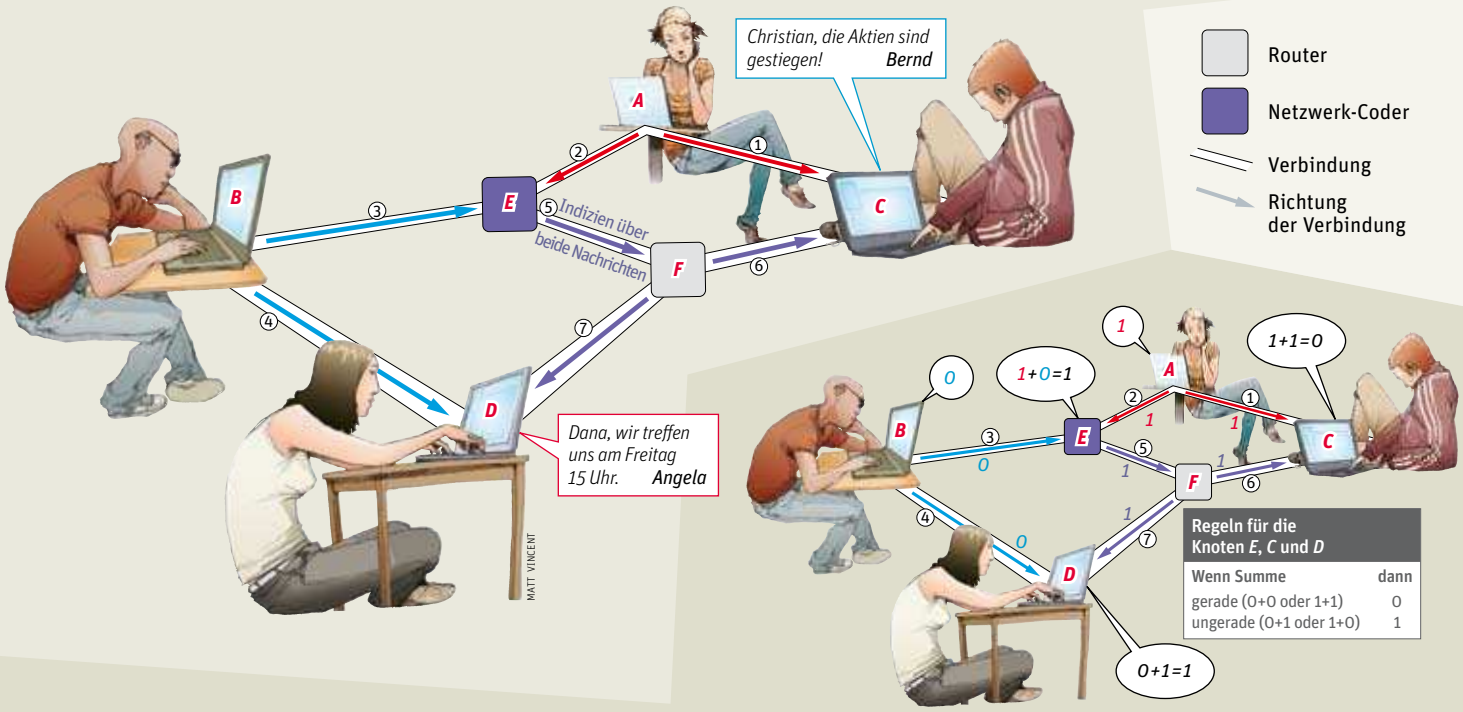



**Gewöhnliches Netz**

Angela schickt von Knoten *A* eine Nachricht an Dana am Knoten *D*, ebenso und zu gleicher Zeit Bernd in *B* an Christian in *C*. Beide Nachrichten treffen an der Engstelle *E* zusammen. Der Router an diesem Knoten kann nur eine von ihnen weiterleiten; die andere muss warten.

**Netzwerkkodierung**

Angela schickt ihre Nachricht wie bisher über Verbindung 2 und zusätzlich über die sonst ungenutzte Verbindung 1 an Christian. Bernd schickt seine Nachricht über Verbindung 3 und 4. Der Coder an Knoten *E* verarbeitet beide Nachrichten von Verbindung 2 und 3 zu einer neuen, ebenso langen Nachricht, die Indizien über beide enthält, und schickt diese verzögerungsfrei über Verbindung 5. Diese Informationen werden über Verbindung 6 und 7 weitergeleitet. Christians Rechner kann Bernds Nachricht mit Hilfe von Angelas Nachricht entschlüsseln; Danas Rechner verfährt entsprechend.




**Entschlüsselung**

Sei Angelas Nachricht eine Eins und Bernds Nachricht eine Null. Sowohl der Coder an Knoten *E* als auch Christians und Danas Rechner verarbeiten zwei eingehende Datenströme nach der Vorschrift aus obenstehender Tabelle. Knoten *E* schickt folglich eine Eins über Verbindung 5. Christians Rechner kombiniert die über Verbindung 1 empfangene Eins mit der Eins von Verbindung 6 zu einer Null und rekonstruiert damit Bernds Nachricht. Danas Rechner setzt die über Verbindung 7 empfangene Eins mit der Null von Verbindung 4 zu einer Eins – Angelas Nachricht – um. In einem großen Netz liegt die Kombinationsvorschrift nicht von vornherein fest; in diesem Fall überträgt der Coder *E* die angewandte Vorschrift zusammen mit den Nachrichten über Verbindung 5 an die Rechner *C* und *D*.

In der klassischen Vorstellung sind die Bits, die kleinsten Informationseinheiten, so etwas wie Autos und ein Router eine Ampel, die von zwei wartenden Autoschlangen immer abwechselnd ein Auto auf die überlastete Straße schickt. Die Netzwerkkodierung lebt zwar davon, dass dieses Bild nicht zutrifft – man kann mit Bits einiges mehr anstellen als mit Autos, ohne sie zu zerstören –; für eine Einführung ist es gleichwohl hilfreich.

Shannon hat auf mathematischem Weg bewiesen, dass jeder Kanal eine Übertragungskapazität hat: Eine gewisse Menge an Information pro Zeiteinheit kann er zuverlässig transportieren; bei höheren Mengen nehmen die Übertragungsfehler überhand. Entsprechend kann die Kapazität einer Straße als die maximale Anzahl an Fahrzeugen beschrieben werden, die sie pro Zeiteinheit sicher bewältigen kann. Sofern die Verkehrslast einer Straße unterhalb ihrer Kapazität bleibt, kommt ein Fahrzeug, das vorne in die Straße einfährt, heil hinten an – von einigen seltenen Unfällen abgesehen.

Ein Computernetz wie insbesondere das Internet ist im Wesentlichen ein Labyrinth aus Straßen, die sich verzweigen, zusammenlaufen und an Kreuzungen aufeinandertreffen. Auf dem Weg von einem Rechner zu einem anderen wandern die Daten einer E-Mail oder eines Webseitenabrufs typischerweise über mehrere solcher Straßen. Die Bits einer einzelnen Nachricht werden zu Paketen (sozusagen die Fahrgemeinschaften oder Busse der Datenautobahn) zusammengeschnürt und die Pakete mit dem jeweiligen Ziel adressiert. Der Router an jeder Straßenkreuzung liest die Adresse auf jedem einzelnen Paket und leitet es in Richtung seines Ziels weiter.

Doch genau dieses Straßenverkehrsmodell, auf dem die aktuellen, hoch entwickelten Kommunikationssysteme beruhen, steht jetzt dem Fortschritt im Weg, weil es die Gedanken hindert, ausgetretene Pfade zu verlassen. Bits sind eben doch nicht mit Autos zu vergleichen. Treffen zwei Fahrzeuge zugleich an einer Engstelle ein, muss eines dem anderen den Vortritt lassen. Bits dagegen haben noch mehr Möglichkeiten.

## Wie Netzwerkkodierung funktioniert

Nehmen wir als Einführungsbeispiel ein sehr kleines Netz aus nur sechs Knoten; es handelt sich um eine leichte Abwandlung des Modells von Ahlswede und Kollegen aus dem Jahr 2000 (Kasten links). Wir erinnern uns, dass Nachrichten in Computern durch Ketten aus Bits – Nullen und Einsen – dargestellt werden. Unser Beispielnetz kann über jede Verbindung (»Straße«) lediglich ein Bit pro Sekunde übertragen, und zwar nur in die durch den jeweiligen Pfeil angegebene Richtung. Angela sitzt am Knoten *A* des Netzes und will Daten an Dana am Knoten *D* verschicken. Zur gleichen Zeit will Bernd eine Nachricht an Christian – von *B* nach *C* – übermitteln. Kann das Netz beide Anforderungen gleichzeitig und ohne Wartezeiten erfüllen?

In einem aus Routern aufgebauten System (links im Kasten) sieht das schlecht aus. Beide Pfade, von Angela zu Dana und von Bernd zu Christian, verlaufen über Verbindung 5, die mit einer einspurigen Brücke vergleichbar ist. Der Router am Knoten *E*, an dem Verbindung 5 beginnt, empfängt zwei Bit pro Sekunde: je eines über die Verbindungen 2 und 3. Da er aber auf Verbindung 5 nur ein Bit pro Sekunde weiterschicken kann, stauen sich immer mehr Bits vor der Engstelle auf.

Wenn jedoch an die Stelle des schlichten Routers ein Coder tritt, der mehr Möglichkeiten hat als ein Verkehrspolizist, ergeben sich neue Möglichkeiten (mittleres Bild in Kasten). Der Coder könnte zum Beispiel die Anzahl an Einsen, die ihn pro Zeittakt erreichen, zählen und genau dann eine Eins übertragen, wenn diese Anzahl ungerade ist. Falls Knoten *E* also gleichzeitig eine Eins von Verbindung 2 und eine Null von Verbindung 3 empfängt, überträgt er eine Eins. Falls er zwei Nullen oder zwei Einsen empfängt, schickt er eine Null über Verbindung 5. Router *F* übermittelt das Ergebnis über die Verbindungen 6 und 7 an Christian und Dana.

Der Coder macht also aus den beiden Nachrichten, die er empfängt, eine Mischung und überträgt diese. Es ist sogar, richtig betrachtet, eine Summe der beiden: Man addiert jeweils zwei Bits modulo 2, das heißt, man behält von der Summe nur den Rest übrig, der bei Division durch 2 bleibt.

Diese Idee erscheint zunächst wie der schiere Unsinn. Wenn durch einen Schaltfehler zwei Telefongespräche überlagert, das heißt ihre Signale addiert werden, versteht keiner der Partner mehr etwas. Verständlicherweise wurde eine derart abwegig erscheinende Idee lange Zeit nicht verfolgt.

Doch in unserem Fall hat der Wahnsinn Methode. Die kombinierte Bitfolge gibt zwar keine der beiden Nachrichten richtig wieder, enthält jedoch ausreichend Indizien über sie. Nehmen wir an, Angelas Nachricht wird zusätzlich über Verbindung 1 an Christian und Bernds Nachricht über Verbindung 4 an Dana gesendet. Da diese Verbindungen bislang ungenutzt sind, geht dabei keine Zeit verloren. Christians Computer empfängt nun über Verbindung 1 ein Bit von Angela und über Verbindung 6 die Information, ob die

## In Kürze

- Im Jahr 2000 präsentierten Forscher eine augenscheinlich verrückte Idee zur **Verbesserung des Datendurchsatzes** in großen Kommunikationsnetzen. Das Konzept der Netzwerkkodierung hat revolutionäres Potenzial. An die Stelle der Router, die Nachrichten an den Kreuzungspunkten des Netzes nur weiterleiten, treten **Coder**, die mehrere Nachrichten miteinander vermischen.
- In Experimenten erzielt die **Netzwerkkodierung** überzeugende Resultate, vor allem wenn es um die Verbreitung derselben Nachricht an viele Empfänger geht (Multicasting).
- Das Verfahren verspricht mehrere Vorteile: Bei unveränderter Hardware erhöht sich der **Durchsatz** des Netzes ebenso wie die **Zuverlässigkeit** und die **Widerstandsfähigkeit** gegen böswillige Angriffe.

Anzahl der Einsen im Nachrichtenpaar von Angela und Bernd gerade oder ungerade ist. Daraus kann er das Bit aus Bernds Nachricht eindeutig rekonstruieren. Auf ähnliche Weise entziffert Danas Rechner Angelas Nachricht.

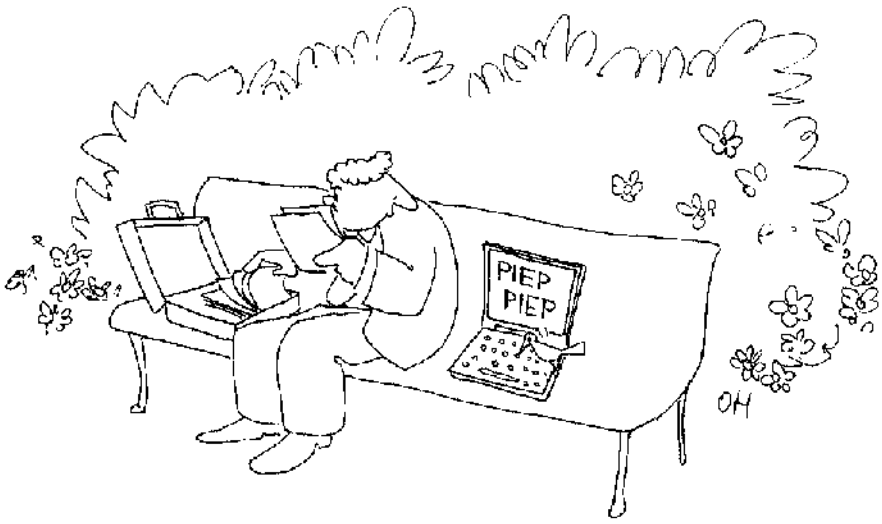
Anders ausgedrückt: Christians Computer empfängt sowohl Angelas Nachricht als auch die »Summe« beider Nachrichten. Daraus kann er Bernds Nachricht, die ihn eigentlich interessiert, durch schlichtes Subtrahieren gewinnen. Obendrein ist Subtrahieren dasselbe wie Addieren – wenn man bitweise modulo 2 rechnet.

*Zwei Nachrichten so zu vermischen, dass keine von beiden mehr erkennbar ist, scheint zunächst der schiere Wahnsinn. Doch der Wahnsinn hat Methode*

Es sind auch andere Mischungsregeln denkbar als schlichtes Addieren. Wenn die angewandte Regel nicht ohnehin bekannt ist, muss der Coder in $E$ sie der eigentlichen Nachricht beigeben, sodass alle Empfänger von ihr Gebrauch machen können.

Mit Autos an Stelle von Bits ist dieses Verfahren schlicht undenkbar: Weder kann man ein Auto auf zwei Wegen zugleich auf die Reise schicken noch kann man zwei Autos so zusammenklumpen, dass sie hinterher problemlos wieder trennbar sind.

In unserem Sechs-Knoten-Modell verdoppelt die Netzwerkkodierung die Datenübertragungsrate: von einem halben Bit pro Sekunde (wegen des Engpasses in Verbindung 5 brauchen beide Nachrichten die doppelte Zeit) auf ein Bit pro Sekunde für jede der beiden Nachrichten. Je nach den Umständen kann man durch Netzwerkkodierung noch höhere Kapazitätssteigerungen erreichen, manchmal allerdings auch gar keine. Das Verfahren verringert jedoch niemals die Kapazität eines Netzes, da es im ungünstigsten Fall das Verhalten eines Routernetzes reproduziert. Obendrein hat es in komplexen, umfangreichen Netzen das Potenzial, die Zuverlässigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Angriffe zu verbessern: Da mehr gemischte Datenpakete unterwegs sind, als zur Rekonstruktion einer Nachricht erforderlich ist, dürfen manche von ihnen ohne Schaden verloren gehen.




Bislang konzentrieren sich die Netzwerkkodierungs-Forscher vor allem auf eine spezielle Form der Datenübertragung, das so genannte Multicasting: ein und dieselbe Nachricht geht an sehr viele Empfänger. Das kommt bei Videospielen vor, in denen alle Mitspieler ständig auf demselben aktuellen Stand sein müssen, sowie beim Fernsehen übers Internet – sehr viele Leute wollen dasselbe Fußballspiel sehen – oder bei der Auslieferung neuer Software an viele Kunden. Wieder kann die Analogie mit dem Straßenverkehr zeigen, warum es meist sehr schwierig ist, solche Netze richtig zu betreiben.

## Massensendungen – gut gemischt

Nehmen wir an, es gibt mehrere Wege zum selben Ziel. Nach welchen Kriterien soll der Router (Verkehrspolizist) die Daten (Autos) auf einen von mehreren verfügbaren Wegen leiten? Erstens so, dass die Autos, denen er den Weg weist, möglichst rasch ans Ziel kommen, zweitens aber auch so, dass der Durchsatz des ganzen Verkehrsnetzes möglichst hoch ist. Beide Ziele würden selbst einen zentralen Verkehrsplaner, der über eine vollständige Karte aller Straßen des Landes verfügt, vor große Probleme stellen. Zudem ändern sich die Verkehrsströme häufig; Baustellen und Unfälle verursachen Staus, die der zentrale Planer berücksichtigen muss.

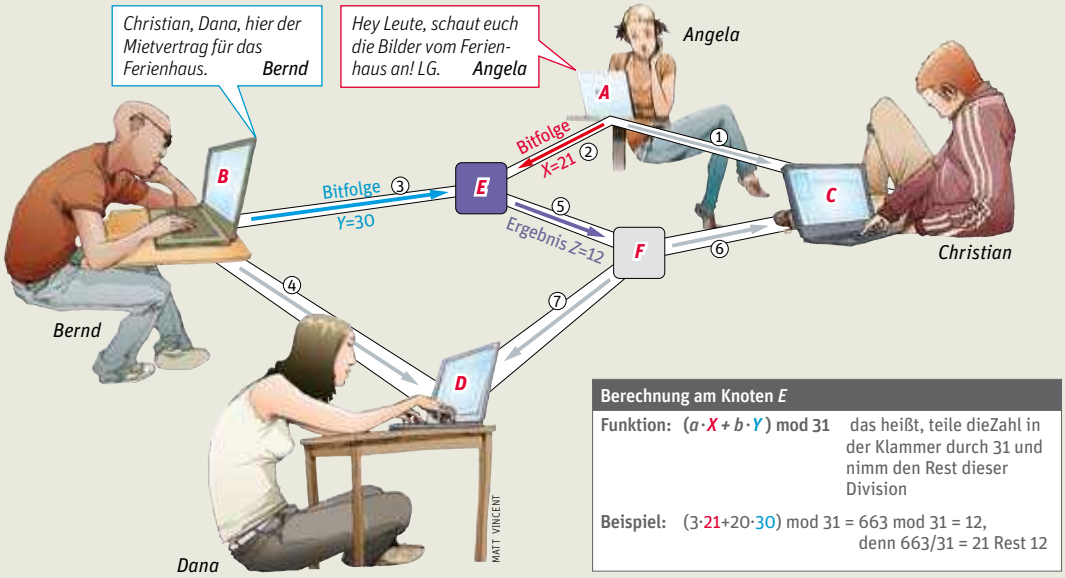
Dasselbe Problem mit Netzwerkkodierung scheint auf den ersten Blick noch schwieriger zu sein, da noch viel mehr Handlungsalternativen zur Verfügung stehen. Ein Knoten kann sich entweder wie ein Router verhalten und Daten unverändert weiterleiten, oder er kann zwei oder mehr ankommende Datenströme nach einer noch zu wählenden Regel kombinieren, bevor er sie weiterleitet. Zusätzlich können verschiedene Knoten verschiedene Regeln verwenden.

Doch glücklicherweise machen in diesem Fall die zusätzlichen Entscheidungsmöglichkeiten das Leben leichter. Im Prinzip müsste der Planer eines Multicasting-Systems alle möglichen Wege vom Sender zu allen Empfängern aufzählen und dann herausfinden, auf welchen Kombinationen von Wegen gleichzeitig Nachrichten übermittelt werden können, ohne sich gegenseitig zu stören. Selbst für relativ einfache Netze wächst die Anzahl der möglichen Kombinationen bald ins Astronomische.

Im Gegensatz dazu wäre ein Multicasting-System mit Netzwerkkodierung überraschend einfach zu entwerfen (Kasten rechts). Das

## Anwendung: Multicasting

Betrachten wir erneut unser Beispielnetzwerk aus sechs Knotenpunkten. Diesmal wollen jedoch sowohl Angela als auch Bernd gleichzeitig eine Nachricht an beide Empfänger, Christian und Dana, verschicken – die Kleinform eines Multicasting-Problems, denn beide Empfänger wollen alle Nachrichten empfangen.




**Berechnung am Knoten *E***

**Funktion:** $(a \cdot X + b \cdot Y) \bmod 31$ das heißt, teile die Zahl in der Klammer durch 31 und nimm den Rest dieser Division

**Beispiel:** $(3 \cdot 21 + 20 \cdot 30) \bmod 31 = 663 \bmod 31 = 12$, denn $663/31 = 21$ Rest 12

**Bitfolgen der Länge $m = 5$**

| *Bitfolge* | *Zahlenwert* | *im Beispiel* |
|---|---|---|
| 00000 | 0 | |
| 00001 | 1 | |
| 00010 | 2 | |
| 00011 | 3 | *a* |
| 00100 | 4 | |
| 00101 | 5 | |
| 00110 | 6 | |
| 00111 | 7 | |
| 01000 | 8 | |
| 01001 | 9 | |
| 01010 | 10 | |
| 01011 | 11 | |
| 01100 | 12 | |
| 01101 | 13 | |
| 01110 | 14 | |
| 01111 | 15 | |
| 10000 | 16 | |
| 10001 | 17 | |
| 10010 | 18 | |
| 10011 | 19 | |
| 10100 | 20 | *b* |
| 10101 | 21 | *X* |
| 10110 | 22 | |
| 10111 | 23 | |
| 11000 | 24 | |
| 11001 | 25 | |
| 11010 | 26 | |
| 11011 | 27 | |
| 11100 | 28 | |
| 11101 | 29 | |
| 11110 | 30 | *Y* |

### Nachrichten mischen

Wie im ersten Beispiel empfängt Knoten *E* Daten über die Verbindungen 2 und 3, mischt sie nach einer gewissen Regel und schickt das Ergebnis über Verbindung 5 weiter. Welche Mischungsregeln würden eine erfolgreiche Kommunikation ermöglichen? Bereits die einfachsten möglichen Regeln, die linearen Funktionen, liefern ein hinreichend reichhaltiges Sortiment.

Die Mischungsregel soll nun nicht mehr auf einzelne Bits angewandt werden, sondern auf Bitfolgen. Eine feste Anzahl $m$ von Bits aus Verbindung 2 wird mit derselben Anzahl an Bits aus Verbindung 3 kombiniert. Wählen wir für unser Beispiel $m = 5$.

Es gibt 32 verschiedene Bitfolgen der Länge 5; eine von ihnen, zum Beispiel 11111, müssen wir aus mathematischen Gründen (siehe unten) ausschließen. Wir weisen jeder der 31 verbleibenden Folgen einen Zahlenwert zwischen 0 und 30 zu (siehe Tabelle). Als Regel für Knoten *E* wählen wir die Funktion $a \cdot X + b \cdot Y$. Dabei sind $X$ und $Y$ die Werte, die E über Verbindung 2 beziehungsweise 3 entgegennimmt (im Beispiel ist $X = 21$ und $Y = 30$). Die Parameter $a$ und $b$ sind beliebig gewählte Bitfolgen der Länge $m$ (im Beispiel ist $a = 3$ und $b = 20$). Zusätzlich stellen wir sicher, dass das Ergebnis der Funktion wieder im Wertebereich zwischen 0 und 30 liegt, indem wir modulo 31 rechnen, das heißt den Rest bei der Division durch 31 nehmen.

Dieses Endergebnis, nennen wir es $Z$, wird dann über Verbindung 5 weitergeschickt.

### Rekonstruktion der Nachrichten

Angela schickt ihre Nachricht über Verbindung 1 an Christian direkt (zusätzlich zur Übertragung an Knoten *E* über Verbindung 2). Christians Computer hat also die Nachricht $X$ sowie die Mischung $Z$ zur Verfügung. Daraus berechnet er $20X + 14Z \bmod 31$, also eine Mischfunktion derselben Art mit anderen Parametern, und erhält $Y$ zurück! ($X$ hat er sowieso.) Wieso?

$20X + 14Z = 20X + 14(3X + 20Y) = 62X + 280Y = Y$, denn $62 = 0 \bmod 31$ und $280 = 1 \bmod 31$. Um die neuen Parameter (im Beispiel 20 und 14) zu bestimmen, muss man ein lineares Gleichungssystem modulo 31 lösen. Das gelingt stets, weil 31 eine Primzahl ist, nicht aber, wenn man etwa modulo 32 statt 31 rechnet. Deswegen darf man nicht mit der vollen Anzahl von 32 Bitfolgen arbeiten.

Danas Computer rekonstruiert die Nachricht $X$ in analoger Weise aus einer Kombination von $Y$ und $Z$.

### Warum die Auswahl der Codes einfach ist

Die Parameter $a$ und $b$ nach dem Zufall auszuwählen scheint zunächst eine alberne Idee zu sein. Es stellt sich jedoch heraus, dass jedes Paar von $a$ und $b$ geeignet ist, solange beide Parameter ungleich null sind.

Warum wählt man dann nicht einheitlich einfache Werte, zum Beispiel $a = b = 1$? In großen Netzen treten unweigerlich mehrfach gemischte Nachrichten auf. So wird ein Empfänger in die Verlegenheit kommen, aus, sagen wir, sieben unterschiedlichen Mischungen von sieben Nachrichten die eine Nachricht herauszufiltern, die an ihn gerichtet ist. Dazu muss er ein Gleichungssystem mit sieben Unbekannten lösen, und das gelingt nur, wenn die Mischungsverhältnisse hinreichend verschieden sind. Da die Knoten sich untereinander nicht über ihre Mischfunktionen verständigen können, ist die erfolgversprechendste Strategie, jeden Knoten seine Funktion per Zufall wählen zu lassen.

Einzige, was die Coder an den Knotenpunkten können müssen, ist addieren und multiplizieren. Zentrale Planung ist nicht erforderlich. Man kann sogar die Mischungsregeln, nach denen die Coder des Netzes arbeiten, unabhängig voneinander und von der Nachricht sowie ohne Kenntnis der Netzstruktur auswählen, und das System als Ganzes wird immer noch mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit mit maximaler Leistung arbeiten. Das gilt ohne irgendwelche Anpassungen auch dann, wenn sich das System mit der Zeit verändert, weil Knoten ausfallen, hinzukommen oder, wie zum Beispiel beim Mobilfunk, ständig neue Verbindungen knüpfen.

Wenn Router durch Coder ersetzt werden, wird sich die Funktion von Netzen stark verändern. Nachrichten werden sich nicht nur »die Straße« mit ihresgleichen teilen, sondern quasi unzertrennlich miteinander verknüpft

## Beschleunigte Datenübertragung

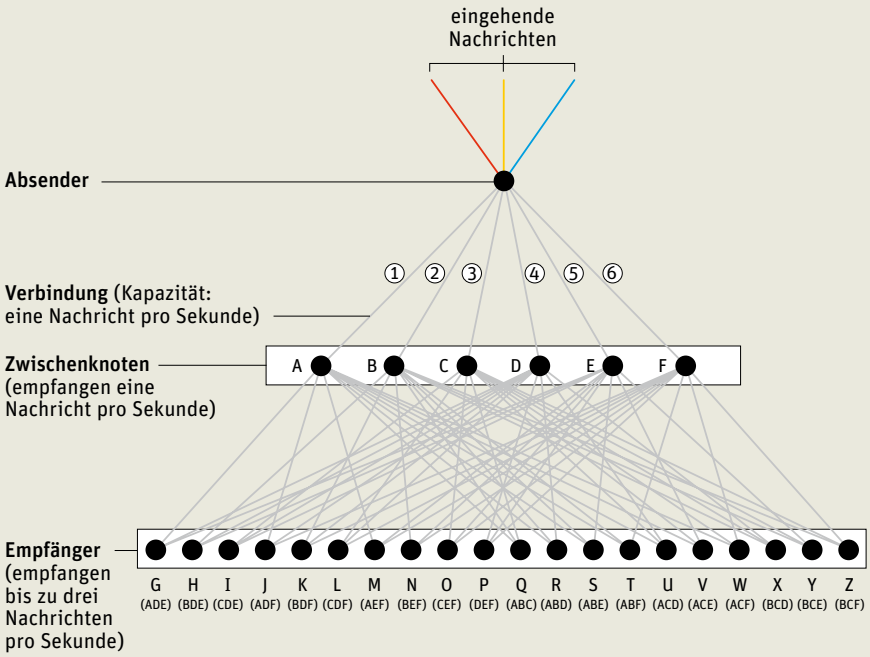
**In diesem Beispielnetz** hat ein Absender drei verschiedene Nachrichten (rot, gelb und blau) an die zwanzig Empfänger *G* bis *Z* weiterzuleiten (Multicasting). Er ist mit ihnen über die sechs Zwischenknoten *A* bis *F* verbunden. Jeder Empfänger hat Verbindung zu genau drei der Zwischenknoten (in Klammern unter dem Empfängernamen angegeben); jede Kombination aus drei Zwischenknoten kommt genau bei einem Empfänger vor. Über jede Verbindung kann eine Nachricht pro Sekunde übermittelt werden. Da in einen Empfänger drei Leitungen münden, könnte er im Prinzip alle drei Nachrichten in einer Sekunde entgegennehmen.

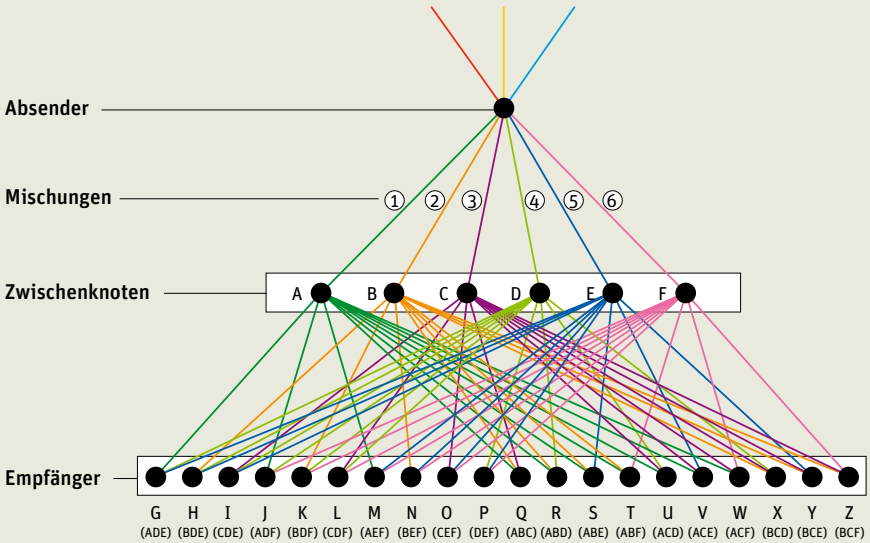
**Kann der Absender** die drei Nachrichten so auf die Knoten *A* bis *F* verteilen, dass jeder Endempfänger alle Nachrichten erhält?

Das ist unmöglich, wenn der Absender nur ein Router ist. Er könnte beispielsweise jede der drei Nachrichten an zwei Zwischenknoten senden. Aber dann bleibt vielen Endempfängern eine Nachricht vorenthalten. Selbst wenn der Absender drei der sechs Zwischenknoten mit ein und derselben Nachricht bedient (was für die anderen Nachrichten schon keine ausreichende Kapazität mehr übrig lässt), geht immer noch ein Empfänger leer aus, nämlich derjenige, der an den anderen drei Knoten hängt.

**Ein Coder dagegen** (unteres Bild) schickt jedem der sechs Zwischenknoten eine andere Linearkombination (Mischung) der Eingangsnachrichten, und zwar so, dass aus je drei Mischungen alle drei Originalnachrichten errechenbar sind. Dadurch steigt die Übermittlungsrate auf drei Nachrichten pro Sekunde gegenüber einer Nachricht im Routerbetrieb: eine Verdreifachung.

Das Beispiel ist auf größere Netze verallgemeinerbar: Mit $2n$ Zwischenknoten erreicht man den $n$-fachen Durchsatz. Die Zahl der potenziellen Endempfänger steigt exponentiell mit $n$.




MELISSA THOMAS

sein. So viel Intimität macht manchen Menschen Sorgen, ihre Nachrichten könnten von wildfremden Menschen mitgelesen werden. In der Tat können die Nutzer unseres kleinen Beispielnetzes (Kasten S. 90) auch die Nachrichten lesen, die nicht für sie selbst bestimmt sind. In großen Netzen tritt jedoch höchstwahrscheinlich eher der gegenteilige Effekt ein. Wo bisher jedermanns E-Mail im Klartext mitlesbar durch die Leitung geht, ist es mit Netzwerkkodierung nur ein sinnloses Gebrabbel, mit dem ein Abhörer an einem einzelnen Punkt nichts anfangen kann. Eine Nachricht in der Mischung dient der jeweils anderen nebenher als Verschlüsselung.

Darüber hinaus werden lange Wartezeiten beim Herunterladen von Videos und unterbrochene Mobilfunkgespräche in Zukunft viel seltener auftreten. Bislang gehen häufig Datenpakete verloren, weil Internet-Router ausfallen oder zwecks Wartungsarbeiten abgeschaltet werden, und müssen dann neu versandt werden. Mit Netzwerkkodierung wird die Zuverlässigkeit der Kommunikation erhöht, da nicht jede einzelne Information bis zum Empfänger durchdringen muss. Und natürlich werden die vorhandenen Kommunikationskanäle besser genutzt als bisher.

## Die Netze von morgen

Bestimmte Dinge werden mit Netzwerkkodierung merklich anders funktionieren als bisher. Das betrifft vor allem den Zugriff auf Dateien, die gegenwärtig an vielen Stellen im Netz vorhanden sind. Bislang sucht ein Nutzer im Internet einen anderen, der die gesuchte Datei bereithält, und lädt sie von dessen Computer herunter. In einem System mit Netzwerkkodierung wäre eine solche Datei gar nicht mehr als Ganzes oder in erkennbaren Teilen gespeichert.

Vielmehr würde auf die Anforderung eines Nutzers hin dessen Rechner oder ein lokaler Server das Netz nach Indizien zur gewünschten Datei durchsuchen, das heißt nach irgendwelchen Mischungen, in denen das Gesuchte enthalten ist. Sowie er eine ausreichende Anzahl solcher Mischungen beisammenhat, löst er ein lineares Gleichungssystem und rekonstruiert damit die ursprüngliche Datei. Selbstverständlich würden all diese Operationen, ähnlich wie die komplizierten Fehlerkorrekturverfahren in Mobiltelefonen, den allermeisten Nutzern verborgen bleiben – und die wären froh darüber.

Das Militär hat die Widerstandsfähigkeit der Netzwerkkodierung erkannt und finanziert nun Forschung über deren Nutzung in mobilen Ad-hoc-Netzen. Auf dem Schlachtfeld ist eine zuverlässige Kommunikation überlebenswichtig und eine Infrastruktur aus Glasfaserleitungen oder Mobilfunk-Basisstationen im Allgemeinen nicht verfügbar. Daher macht man das Funkgerät jedes einzelnen Soldaten zum Knotenpunkt eines Kommunikationssystems mit variabler Struktur. Jeder Knotenpunkt sucht und baut Verbindungen zu seinesgleichen auf; alle Einzelverbindungen zusammen ergeben das Netz. Jeder Knoten ist Sender, Empfänger und Vermittlungsstelle zugleich. Damit ist die Reichweite des Netzes weit höher als die eines einzelnen Funkgeräts. Während sich die Soldaten bewegen, wandert das Netz mit, wobei ständig Verbindungen gekappt und neue geknüpft werden.

Bevor jedoch das ganze Internet auf Netzwerkkodierung umgestellt wird – und die neuen Funktionsweisen ungeahnte gesellschaftliche Auswirkungen haben –, gibt es noch etliche Hindernisse zu überwinden. Dabei wäre die Ersetzung der bisherigen Router durch Coder noch eins der kleineren Probleme. Da beide Systeme koexistieren können, müsste man nur allmählich einen Router nach dem anderen zu einem Coder umprogrammieren und diejenigen, bei denen das nicht möglich ist, Stück für Stück ersetzen.

Schwieriger wird es, das Verhältnis von Aufwand zu Erfolg in einem günstigen Bereich zu halten. Das Mischen von Informationen ist nur dann eine gute Strategie, wenn die für den Empfänger interessante Nachricht nicht allzu »verdünnt« bei ihm ankommt oder, anders ausgedrückt, wenn er für diese Nachricht nicht allzu viele Mischungen entgegennehmen muss. Beim Multicasting gelingt das regelmäßig, im Allgemeinen jedoch nicht unbedingt.

Unter gewissen Umständen, zum Beispiel wenn mehrere Multicasts gleichzeitig übertragen werden, kann die Mischung auch missraten, sodass die Rekonstruktion fehlschlägt. Wie soll nun ein Knotenpunkt wissen, welche Informationen er miteinander mischen darf und welche nicht? Wie muss sich die Netzwerkkodierung in drahtlosen von der in drahtgebundenen Netzen unterscheiden? Wie wirkt sie sich auf die Datensicherheit aus? Wie sind die Kosten der Übermittlung den Kunden zuzurechnen, wenn die Nachricht eines Kunden, unentwirrbar vermischt mit denen anderer, in vielen Portionen über viele Leitungen wandert?

In weltumspannenden Arbeitsgemeinschaften arbeiten wir und viele andere an Lösungen zu diesen Fragen. Damit bemühen wir uns, die Leistungsfähigkeit der Kommunikationsnetze zu erhöhen, die zu einem so wesentlichen Bestandteil unserer Gesellschaft geworden sind. ◁

**Michelle Effros, Ralf Kötter** und **Muriel Médard** arbeiten seit langer Zeit zusammen. Effros ist Professorin für Elektrotechnik am California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena. Kötter ist Professor und Leiter des Instituts für Nachrichtentechnik an der Technischen Universität München. Médard ist Assistenzprofessorin für Elektrotechnik und Informatik am Massachusetts Institute of Technology und gehört zur Leitung des dortigen Laboratoriums für Informations- und Entscheidungssysteme.
Die Autoren danken Joschi Brauchle für seine Unterstützung bei der Abfassung der deutschen Version.

A random linear network coding approach to multicast. Von T. Ho et al. in: IEEE Transactions on Information Theory, Bd. 52, Nr. 10, S. 4413, Oktober 2006

Polynomial time algorithms for multicast network code construction. Von S. Jaggi et al. in: IEEE Transactions on Information Theory, Bd. 51, Nr. 6, S. 1973, Juni 2005

An algebraic approach to network coding. Von R. Kötter and M. Médard in: IEEE/ACM Transactions on Networking, Bd. 11, Nr. 5, S. 782, Oktober 2003

Linear network coding. Von S.-Y. R. Li, R. W. Yeung and N. Cai in: IEEE Transactions on Information Theory, Bd. 49, Nr. 2, S. 371, Februar 2003

Network information flow. Von R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. R. Li und R. W. Yeung in: IEEE Transactions on Information Theory, Bd. 46, Nr. 4, S. 1204, Juli 2000

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/940422.

WÄRMEZÄHLER UND HEIZKOSTENVERTEILER

# Wie misst man Behaglichkeit?

Chemie und Elektronik helfen, Kosten gerecht zu verteilen.

Von Bernhard Gerl

Heizen kostet Geld. Werden Öl und Gas verbrannt, trägt es zudem einen Gutteil zum Treibhauseffekt bei! Allein Privathaushalte wenden mehr als drei Viertel der verbrauchten Energie dafür auf, um Räume und Brauchwasser zu erwärmen. Wie viel Brennstoff in einem Jahr vonnöten war, lesen Hausbesitzer am Füllstand des Öltanks beziehungsweise an der Jahresendabrechnung des Gaslieferanten ab. Versorgt eine Heizungsanlage aber mehrere Wohnungen oder Gewerberäume, müssen die anfallenden Kosten mit Hilfe von Messfühlern aufgeteilt werden.

Ein Posten auf der Endabrechnung ist das Warmwasser, das aus dem Hahn in der Küche oder aus dem Duschkopf fließt. Mechanische Zählwerke registrieren das Volumen: Der Wasserstrom treibt ein Flügelrad an, dessen Drehzahl der durchfließenden Menge proportional ist. Optimal wäre nun, ein Messgerät am Öl- beziehungsweise Gasbrenner würde die zur Wassererwärmung verbrauchte Brennstoffmenge separat aufzeichnen. Das ist jedoch nur selten gegeben. Deshalb enthält die 1981 in Kraft getretene Heizkostenverordnung eine Formel, die den Gesamtverbrauch zu dem gemessenen Warmwasservolumen in Beziehung setzt.

Auch um behagliche Raumtemperaturen zu erreichen, muss zunächst Wasser erwärmt werden; es dient als Transportmedium und fließt zum Beispiel durch Heizkörper. Die genannte Verordnung schreibt eine verbrauchsabhängige Abrechnung vor. Mit anderen Worten: Die von jedem Nutzer aufgewendete Wärmemenge ist separat zu bestimmen. Dazu verwendet man meist so genannte Heizkostenverteiler oder Wärmezähler.

Bewährt und seit Langem im Einsatz sind chemische Heizkostenverteiler: In einem oben offenen Röhrchen verdampft Methylbenzoat oder 1-Hexanol, laut Bundesgesundheitsamt in unbedenklichen Mengen. Das Röhrchen steckt in einem Gehäuse, dessen Rückteil fest mit dem Heizkörper verbunden ist. An dem abnehmbaren, mit einer Plombe gesicherten Vorderteil befindet sich ein Sichtfenster mit einer Skala. Aus der verdampften Menge und einem von Bauart und Größe des Heizkörpers abhängigen Faktor lässt sich die abgegebene Wärme berechnen.

**Genauer arbeiten elektronische Heizkostenverteiler.** Ein Sensor, dessen elektrischer Widerstand von seiner Temperatur abhängig ist, misst die Daten von Heizkörper und Raum; ein eingebauter Prozessor schließt aus der Differenz auf die abgegebene Wärmemenge. Solche Geräte können jederzeit – also auch bei einem Mieterwechsel – abgelesen werden, einige sogar per Funk.

Noch exakter arbeiten elektronische Wärmezähler, die dort angebracht werden, wo die Heizwärme in die Wohnung oder in Gewerberäume eintritt. Sind keine Heizkörper zugänglich, etwa bei einer Fußbodenheizung, oder sorgt keine Anlage im Gebäude, sondern ein Anschluss an ein Fernwärmenetz für Wohlfühltemperaturen, lassen sich die anteiligen Kosten ohnehin nicht anders ermitteln. Ein solcher Wärmezähler misst die Menge des zufließenden Wassers mit mechanischem Zähler, die Temperaturen im Zu- und Ablauf mit zwei Widerstandsthermometern. Daraus berechnet eine Elektronik die aktuelle Wärmeleistung und summiert die Daten auf. Die seit dem Einbau des Geräts aufgewendete Wärmemenge lässt sich auf einem Display ablesen.

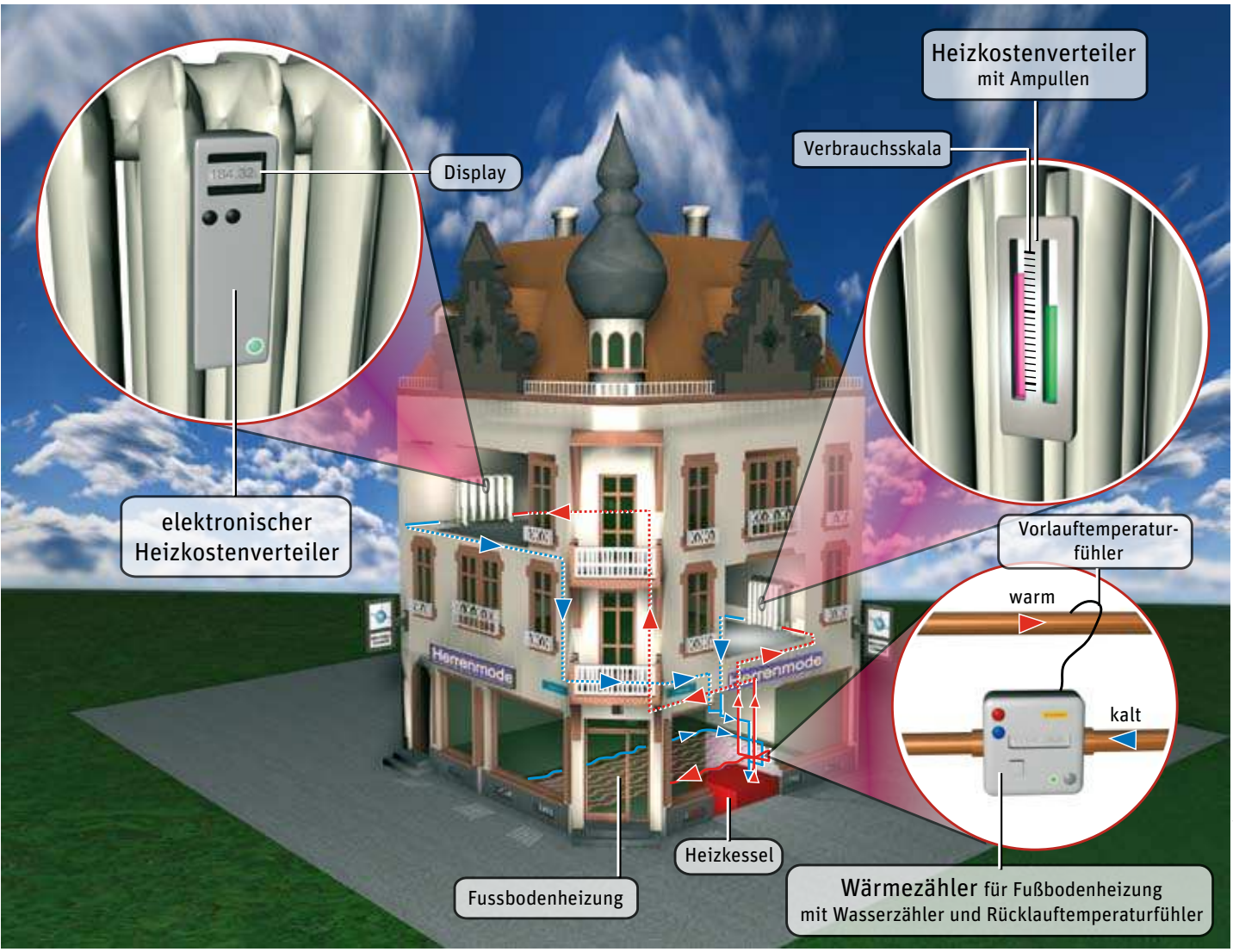
Der Physiker **Bernhard Gerl** arbeitet als Technikpublizist in Mainz.

## Wussten Sie schon?

▶ **In Internet-Foren** wird gelegentlich diskutiert, wie sich Heizkostenverteiler manipulieren lassen. Meist überlegen die Teilnehmer, die Verdunstung chemischer Sensoren durch eine Abdeckung zu verringern. Ein solches Vorgehen verstößt nicht nur gegen das Gesetz, es erreichte auch das genaue Gegenteil. Denn jede Abdeckung reflektiert die vom Heizkörper ausgestrahlte Wärme und fördert so die Verdunstung.

▶ **Als Kaltverdunstung** bezeichnet man den Anteil an Messflüssigkeit, der in Heizkostenverteilern auch bei ausgeschaltetem Heizkörper verdampft. Die bei der Ablesung neu eingesetzten Röhrchen enthalten deshalb einen geringen Überschuss, der diesen Verlust kompensiert. Er entspricht genau der Menge, die in 120 Tagen bei einer Umgebungstemperatur von zwanzig Grad Celsius entweicht.

**Teilen sich mehrere Personen die Nutzfläche eines Gebäudes, müssen die anfallenden Kosten für Heizung und Warmwasser gerecht verteilt werden. Die genaueste Umrechnung ermöglichen Wärmemengenzähler, in Mietwohnungen sind die kostengünstigeren Heizkostenverteiler in Gebrauch, sei es in der elektronischen Variante oder in Form des bekantnen »Röhrchens« am Heizkörper.**




SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM

**Elektronische Geräte** benötigen Strom, mechanische Systeme unterliegen Verschleiß. Deshalb sind Wärmemengen- ebenso wie Warmwasserzähler nur für wenige Jahre geeicht und müssen danach ausgewechselt werden. Insbesondere Mieter sollten bei Zweifeln an ihrer Heizkostenabrechnung die Geräte prüfen: Ist nämlich die Eichfrist abgelaufen, können sie die Abrechnung anfechten.

**Ein Teil** der von einer Heizung erzeugten Wärme entweicht aus dem Gebäude, ein anderer geht beim Transport durch die Rohrleitungen verloren, und Wohnungen, die nicht beheizt werden, profitieren von den Nachbarn. Aus diesem Grund dürfen nur fünfzig bis siebzig Prozent der gesamten Energiekosten nach Verbrauch abgerechnet werden, den Rest legt man nach der beheizbaren Wohnfläche oder dem umbauten Raum um.

INNOVATIONEN

# Allemal unterhaltsam

Vom Rückenwind erzeugenden Tunnel für Radfahrer bis hin zur Kernfusion bietet das Werk einen bunten Querschnitt durch die Projekte deutscher Forschungsstätten.

Was werden wir essen? Wie werden wir uns fortbewegen? Wie miteinander kommunizieren? Ausgehend von Ergebnissen der aktuellen Forschung stellt dieser zweifarbig (schwarz-weiß und bronze) bebilderte Band innovative Techniken und neuartige Infrastrukturen für alle Lebensbereiche vor, die unser Jahrhundert prägen werden – oder zumindest die nächsten Jahrzehnte. Die Auswahl traf eine 17-köpfige Jury aus Wissenschaftlern und der jungen Grünen-Politikerin Anna Lührmann unter dem Vorsitz des Physik-Nobelpreisträgers Theodor Hänsch. Gesundheit, Ernährung, Umwelt, Energie, Computer, Sicherheit, Architektur sowie Verkehr und Produktion lauten die Kapitelüberschriften. Jede Idee wird kurz auf einer Doppelseite angerissen. Inhaltliche Tiefe darf man nicht erwarten.

Das Vermitteln von Detailkenntnissen ist auch nicht das Anliegen dieses Kompendiums. Es stimmt ein auf ein Leben in einer möglichen Zukunft. Für Neugierige, die es nach ausführlichen Informationen dürstet, gibt es zu jeder vorgestellten Neuerung Internet-Links. Dazu werden die Akteure hinter jeder Idee mitsamt ihren Forschungsinstituten aufgelistet – gut für den Human Touch, den auch die harte Wissenschaft verdient hat, aber für meinen Geschmack manchmal ein wenig zu akribisch.

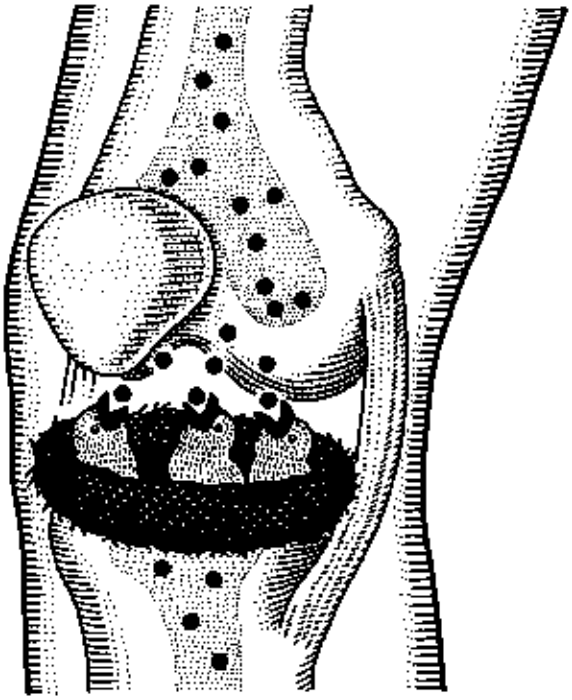
Hochgradig erfrischend sind hingegen die überaus großzügigen Illustrationen. Alfred Schüssler, bekannt als Zeichner von politischen Karikaturen unter anderem für die »Frankfurter Allgemeine Zeitung«, stellt jeder Idee eine fantasievolle Grafik zur Seite. Angenehm ist zudem die kompakte Form: Auf einer einzigen Seite steht alles Wichtige zu jedem Projekt. Die kurzweilig geschriebenen Texte beginnen meist mit einem Blick in die Zukunft, beschreiben Szenarien, die künftig zum alltäglichen Leben gehören könnten, wenn ein heute aktuelles Problem gelöst ist, und enden oft mit einem verbalen Augenzwinkern. Jedes Themengebiet wird zudem von einer bekannten Persönlichkeit eingeführt, sei es von Jürgen Mlynek, dem Präsidenten der Helmholtz-Gemeinschaft (Energie), von Karlheinz Brandenburg, dem Direktor des Fraunhofer-Instituts für Digitale Medientechnologie (Computer), oder von der erfolgreichen Rallyefahrerin Jutta Kleinschmidt (Verkehr).

Bei Bedarf erklären zusätzliche kurze Texte Fachbegriffe wie »Polymer« oder spezielle Techniken und Verfahren wie die Gentechnik, die Brennstoffzelle oder die Verbindung der Biologie mit der Technik zur so genannten Bionik. Auf wenige Zeilen begrenzte Randbemerkungen an den Fließtexten fassen die jeweiligen Ideen prägnant zusammen und bieten einen zügigen Überblick. Das Buch lädt zum Schmökern ein. Nach Lust und Laune kann sich der Leser jeweils für kurze Zeit in die Zukunft mitnehmen lassen.

Doch überzeugen nicht alle vorgestellten Einfälle. Manche sind zu technisch gedacht wie das geplante, flächendeckende unterirdische Rohrpost-System für Waren und Güter der Ruhr-Universität Bochum, bei dem im erklärenden Text das Wort »Kosten« wohlweislich nicht auftaucht. Ähnliches gilt für ein Tunnelsystem für Radfahrer des Fachgebiets Sportgeräte und Materialien der Technischen Universität München, bei dem die Radler bei künstlich erzeugtem Rückenwind die Natur stets in geschlossenen Röhren »genießen« sollen. Selbst die Visionen, die eher als Utopien anzusehen sind, öffnen oft auf spielerische Weise den Geist und lassen die Kreativität durchscheinen, mit der die Wissenschaftler die Zukunftsfragen angehen wollen. Gleichwohl hoffe ich, dass einige Visionen weder 2015 noch irgendwann Realität werden.

Wirklichkeitsferne Vorstellungen bilden aber die Ausnahme. Es geht meist um aktuelle Arbeiten, die heute bereits konkret in

**Das Projektteam HyWindBalance entwickelt ein Verfahren, Windenergie in Form von Wasserstoff zu speichern (links). Gegen Knorpelschäden am Knie baut das Labor für Tissue Engineering der Berliner Charité ein »Nest« aus künstlichen Fasern ins Gelenk, mit »Lockstoffen«, die Stammzellen aus dem Knochenmark zum Einwandern und zur Bildung neuen Knorpels anregen (rechts).**



den Laboratorien vorangetrieben werden. Das gilt für das transparente Display für Windschutzscheiben, das aktuelle Verkehrsinformationen zeigt, ebenso wie für die Leuchtdioden, mit denen Daten rasch ausgetauscht werden können, oder für Krankheitserreger, die Krebszellen befallen sollen und so Todkranke genesen lassen.

Einige der vorgestellten Produkte sind nahezu marktreif oder zum Teil sogar zu kaufen wie der Frequenzkamm von Menlo-Systems, einer Firma, die zwei Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik zusammen mit dem Herausgeber des Buchs gegründet haben. Andere Visionen begegnen uns voraussichtlich erst in ferner Zukunft wie der Computerchip, der, im Hirn eines Menschen eingepflanzt, dessen Erinnerungsvermögen steigern helfen soll, oder die Kernfusion, die der Wissenschaftliche Direktor des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik, Alexander Bradshaw, auf das Jahr 2050 taxiert – voraussichtlich!

Alles in allem sind die 100 Produkte mit Bedacht und einer gehörigen Portion an Realitätssinn ausgewählt. Das Buch bietet eine gelungene Darstellung von Techniken, Methoden und Visionen, von denen die eine oder andere mit großer Wahrscheinlichkeit unser künftiges Leben prägen wird. Herausgeber Hänsch führt ein weiteres Kriterium an: Er finde »die meisten der dort vorgestellten Neuerungen auf jeden Fall witzig«. Unterhaltsam ist das Werk allemal.

*Gerhard Samulat*

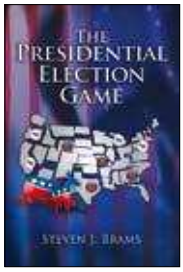
Der Rezensent ist freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.

Theodor W. Hänsch (Hg.)
**100 Produkte der Zukunft**
Wegweisende Ideen,
die unser Leben verändern werden
Econ, Berlin 2007. 255 Seiten, € 24,90

POLITOLOGIE

# Sind alle Politiker reine Egoisten?

Das hat Steven Brams so nicht gesagt. Aber er baut auf dieser Voraussetzung ein mathematisches Modell ihres Verhaltens auf, und das Ergebnis kommt der Realität beklemmend nahe.




Dies ist ein sehr verstörendes Buch. Das liegt nicht in erster Linie an der Person des Autors oder am Thema: Steven J. Brams, Professor für Politologie an der Universität New York, hat in zahlreichen Büchern die verschiedensten politischen Konstellationen mit den Mitteln der Spieltheorie kenntnisreich analysiert und sich dafür erhebliche Anerkennung bei den mathematischen Meistern des Fachs erworben. Diesmal geht es um eines der spannendsten politischen Spiele überhaupt: den amerikanischen Präsidentschaftswahlkampf.

Es liegt auch nicht am Alter des Stoffs. Brams bekennt im Vorwort freimütig, dass er für dieses – aus aktuellem Anlass zusammengestellte – Buch tief in die Kiste mit seinen dreißig Jahre alten Werken gegriffen hat. Er hat sich noch nicht einmal die Mühe gegeben, den Text oberflächlich anzupassen. So stehen seine Ausführungen zur Watergate-Affäre von 1974 unter dem Vorbehalt, dass bei einem so relativ neuen Ereignis noch mit weiteren Enthüllungen zu rechnen sei. Ronald Reagan kommt bereits vor, aber nur als Verlierer der republikanischen Kandidatenkür von 1976 – wäre es nur dabei geblieben! –; Figuren wie Barry Goldwater und George McGovern, an die man sich mühsam erinnern muss, spielen bedeutende Rollen, und das unglaubliche Kopf-an-Kopf-Rennen zwischen George W. Bush und Al Gore 2000 lässt sich Brams entgehen, obgleich es perfekt in seine Theorie passt (Spektrum der Wissenschaft 1/2001, S. 22).

Ganz im Gegenteil: Es spricht für den Autor, dass er einen großen Teil dessen, was heute in der Spieltheorie eifrig diskutiert wird, schon 1978 hatte. Die Darstellung ist etwas wortreicher, als wir es heute gewohnt sind, das bekannte spieltheoretische Gleichgewicht trägt noch nicht den Namen »Nash«, der Drang der Kandidaten zur Mitte des politischen Spektrums wird noch nicht mit dem Hotelling-Paradox der Eisverkäufer identifiziert, aber von all diesen Dingen ist bei Brams bereits die Rede. Insofern ist sein altes Werk frisch wie am ersten Tag.

Brams hat sogar schon die Sache mit der Quadratwurzel, die im vergangenen Sommer auf europäischer Ebene heftige Diskussionen auslöste (Spektrum der Wissenschaft 8/2007, S. 102), wenn auch in völlig anderer Form. Anscheinend unabhängig von dem Ersterfinder Lionel Penrose legt er dar, dass die faktische Bedeutung eines einzelnen US-Bundesstaats in dem Wahlmännergremium, das schließlich den Präsidenten bestimmt, nicht etwa proportional der Zahl $N$ seiner Wahlmänner ist, sondern proportional $N^{3/2}$. Genau diese Übergewichtung der großen Bundesstaaten ist es, die durch die Wurzelformel kompensiert werden soll. Brams rechnet sogar nach, dass die Präsidentschaftskandidaten im Wahlkampf ihre Zuwendung ungefähr nach dem $N^{3/2}$-Gesetz auf die Bundesstaaten zu verteilen pflegen. Der Nachweis ist nicht ganz einfach, weil die Vorschrift, dass jeder Staat mindestens drei Wahlmänner haben muss, die kleinen Staaten begünstigt und damit den genannten Effekt abschwächt.

Nein; was verstörend wirkt, ist der Zynismus, der zwischen den Zeilen hervorscheint. Und der ist noch nicht einmal dem Autor anzulasten. Brams tut nichts weiter, als von gewissen Voraussetzungen ausgehend mathematische Modelle zu bilden und zu diskutieren. Aber die Voraussetzungen haben es in sich! In Brams' Modellvorstellungen ist ein Präsidentschaftskandidat ein rationaler Nutzenmaximierer im Sinn der Spieltheorie, und das heißt, er will nur das Eine: Präsident werden. Welche politische Position er einnimmt, ist völlig belanglos; er ordnet jede Überzeugung ohnehin dem einen großen Ziel unter. Das Einzige, was ihn daran hindern könnte, die wählerstimmenträchtige Position der Mitte einzunehmen und sich damit von seinen Konkurrenten praktisch ununterscheidbar zu machen, sind seine Aktivisten. Das sind Idealisten, auf deren Unterstützung er nicht verzichten kann und

**Ein rationaler Nutzenmaximierer hat kein politisches Ziel. Er will nur das Eine: Präsident werden**

die er nicht durch zu große Anpassung an den Publikumsgeschmack verprellen darf. Da muss er – Analysis 12. Klasse – die Position halbwegs zwischen der extremen Position der Aktivisten und der Mitte der Wählerschaft finden, die das Produkt aus Unterstützung und Wählergunst maximiert.

Seine Kampfgenossen sind kein bisschen besser. Während der Vorausscheidung innerhalb einer Partei gibt es den viel beschriebenen *bandwagon*-Effekt: Sowie ein Kandidat als der voraussichtliche Sieger des Nominationskampfes wahrgenommen wird, strömen ihm lawinenartig die bisher noch unentschiedenen Parteifreunde zu. Brams weiß das mit dem Nutzenkalkül der Freunde zu erklären: Für den am Ende siegreichen Kandidaten zählt ein neuer Freund nur dann, wenn er durch seine Stimme zum Sieg beiträgt und wenn er nicht – mangels Alternative – sowieso kommt. Der Lohn – in Form von Posten, Geld oder Einfluss –, den der Kandidat dem Freund zahlt, wird sich an der so bemessenen Bedeutung des Freunds orientieren. Der Freund wiederum will nichts anderes, als diesen Lohn zu maximieren. Dazu muss er im richtigen Moment auf den *bandwagon* springen: nicht zu früh, denn es könnte ja noch der andere gewinnen, und nicht zu spät, weil es dann auf seine Stimme ohnehin nicht mehr ankommt. Mit ein paar Zusatzannahmen kann Brams diese Überlegungen quantifizieren und kommt zu einem nachprüfbaren Ergebnis.

Mit denselben Grundannahmen kommt Brams zu interessanten Aussagen über Koalitionen (die im amerikanischen System stets informeller Natur sind, wie der Unterstützerkreis eines Präsidenten): Nur eine minimale Koalition ist stabil. Wenn sie Mitglieder entbehren kann, ohne ihre Mehrheit zu verlieren, dann wird sie das über kurz oder lang tun. Denn dann verteilt sich der Nutzen, den die Beteiligten aus der Koalition ziehen, auf weniger Köpfe. Hier hat Brams allerdings Schwierigkeiten mit dem Verifizieren, denn unter der stets erfüllten Voraussetzung, dass man sich seiner Freunde nie sicher sein kann, sind übergroße Koalitionen durchaus rational im Sinn der Nutzenmaximierung; und über die Geschwindigkeit, mit der eine Koalition dem Gleichgewichtszustand, nämlich der minimalen Größe, zustrebt, sagt die Theorie auch nichts aus.

Ist die Politik im Allgemeinen und die im Umkreis des amerikanischen Präsidenten im Besonderen wirklich so schlimm? Spielen die Überzeugungstäter und die integren »leitenden Angestellten des Volks« eine so unbedeutende Nebenrolle? Das folgt nicht zwingend aus Brams' Analyse. Es ist eben die Tücke der mathematischen Modellierung, dass sie nur das sieht, was man in die Voraussetzungen hineinsteckt: in diesem Fall die rationalen Nutzenmaximierer. Verstörend bleibt nur, dass dieses – in der Tat sehr einäugige – Modell den amerikanischen Präsidenschaftswahlkampf ziemlich vollständig zu beschreiben scheint.

*Christoph Pöppe*

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Steven J. Brams
**The Presidential Election Game**
A K Peters, Wellesley (Massachusetts) 2008.
194 Seiten, $ 29,–

ENDOKRINOLOGIE

# Es sind nicht immer die Hormone

Wenn sie es sind, dann nur, weil sie Nachrichten überbringen. Vivienne Parry hilft, diese zu entschlüsseln.

»Das sind die Hormone!« Diese Antwort muss heutzutage für nahezu alles herhalten: die plötzliche Hungerattacke, den Schweißausbruch oder auch nur die miese Laune des pubertierenden Sohnemanns. Doch wesentlich mehr als diese Pauschalaussage und vielleicht ein paar Namen wie Testosteron, Östrogen oder Insulin ist den meisten Menschen nicht geläufig. Mit diesem Halbwissen aufzuräumen hat sich Vivienne Parry zum Ziel gesetzt. In ihrem neuen Buch erklärt die renommierte britische Wissenschaftsjournalistin, welche Hormone für welche Prozesse verantwortlich sind, dass sie viele unserer Gefühle maßgeblich beeinflussen – und andere wieder nicht.

Wenn sich ein Pubertierender impulsiv, launisch, ungezogen und absolut egozentrisch verhält, liegt das angeblich daran, dass Hormone wie das männliche Sexualhormon Testosteron oder das Wachstumshormon explosionsartig ausgeschüttet werden. Doch mittlerweile, so Parry, erklärt man einen Großteil dieses Verhaltens mit dem Reifeprozess des jugendlichen Gehirns, der – auch dies eine relativ neue Erkenntnis – erst mit 18 oder 19, manchmal sogar 20 Jahren abgeschlossen ist. Vor allem im präfrontalen Kortex werden die Nervenfasern neu sortiert und umgestaltet. Und genau in diesem Bereich des Gehirns findet vorausschauendes Denken ebenso statt wie das Sich-hinein-Versetzen in die Gefühle anderer Menschen, Fähigkeiten, die man Jugendlichen gerne aberkennt. Im Fall des übel gelaunten Teenagers sind also die Hormone höchstens indirekt an allem schuld.

Doch Parry zeigt auch Beispiele für das Gegenteil auf. Gerade das Testosteron, um das sich viele Mythen ranken, hat die unterschiedlichsten Wirkungen. Dass das »Männerhormon« Urheber Nummer eins für Aggression und Mord sein soll, ist Unfug. Der Testosteronspiegel steigt erst infolge von Aggression, und deren Ursache sind wiederum eher Stress und sein hormoneller Überträger, das Cortisol. Dagegen ist das Vorurteil, dominante und erfolgreiche Frauen hätten einen besonders hohen Testosteronspiegel, interessanterweise zutreffend – aber davon werden sie noch lange nicht zu »Mannweibern«. Außerdem beeinflusst die Menge dieses Steroids in der Gebärmutter das spätere Verhalten des Ungeborenen, unabhängig von dessen genetischem Geschlecht. Je mehr davon, desto systematischer – also vermeintlich »männlicher« – ist das Kind veranlagt, und je weniger davon, desto mehr neigt es später zu Empathie, einer Eigenschaft, die als typisch weiblich gilt.

Parry beschreibt in diesem Zusammenhang ausführlich die Erkenntnisse des britischen Psychologen und Autismus-Forschers Simon Baron-Cohen. Für ihn ist eine bestimmte Form des Autismus, das so genannte Asperger-Syndrom, ein Extrem des männlichen Gehirntyps. Seine jüngsten Forschungen konnten zwischen der Testosteronkonzentration in der Gebärmutter und dem Auftreten des Asperger-Syndroms eine positive Korrelation nachweisen.

Die Autorin versteht ihr Handwerk. Schließlich ist sie Wissenschaftsreporterin für die englische Tageszeitung »The Guardian«, zuvor arbeitete sie jahrelang für die

## Planetenjäger

**Entdecke das Sonnensystem!**

*Inhalt: 1 Spielplan, Spielfiguren: 6 Raketen, 9 Planeten, 1 Komet, 3 Außerirdische, 60 Treibstoffkristalle, 48 Planetenkarten, 1 Würfel, Spielanleitung und Infobroschüre »Unser Sonnensystem«, Campagames.*

**Bestell-Nr. 2516. € 32,– (D), € 32,– (A)**

Auf ihrer Mission durch unser Sonnensystem passiert die rote Rakete den Zwergplaneten Pluto. Plötzlich schlägt ein Komet im Saturn ein. Während alle Planetenjäger ihre mühevoll ergatterte Saturn-Spielkarte zurückgeben müssen, dringt schon ein weiterer Komet ins Sonnensystem ein. Die Würfel fallen und das Spiel geht weiter ... Planetenjäger ist ein Spiel voller Dynamik und Spannung. Für 2–6 Spieler ab 8 Jahren. Spieldauer ca. 60 Minuten.

## Astra Plus satellitengestützte Funkwetterstation

**Mit WETTERdirekt-Technologie – funktioniert nur in Deutschland!**

*Detaillierte Darstellung mit 36 verschiedenen Wettersymbolen, Anzeige der voraussichtlichen Höchst- und Tiefstwerte für jeden Tag, Außentemperatur und Luftfeuchtigkeit über kabellosen Außensender (868 MHz), besonders hohe Reichweite bis 100 m (Freifeld), Innentemperatur, Uhrzeit mit Weckalarm und Datum, Gehäuse perlmutweiß, inkl. Batterien 2 x C für Empfänger, 2 x AA für Sender, 150 x 150 x 55mm, 586g. TFA Dostmann.*

**Bestell-Nr. 2374. € 59,90 (D), € 59,90 (A)**

WETTERdirekt revolutioniert Ihre Wettervorhersage! Denn mit WETTERdirekt erhalten Sie eine regionale Wetterprognose, von professionellen Meteorologen erstellt, per Satellitentechnik kostenlos und vollautomatisch auf Ihre Station.

## Magic Floater Schwebeglobus

**Der freischwebende Globus**

*Stromversorgung: 220 V (Adapter im Lieferumfang enthalten), Abmessungen: Globus – Durchmesser 140 mm, Basiseinheit in Chromoptik – Durchmesser 170 mm. PEROS ELECTRONICS.*

**Bestell-Nr. 2498. € 99,– (D), € 99,– (A),**

Die erste frei schwebende Weltkugel – ein faszinierendes High-Tech-Produkt der modernen Physik. Mittels CCL –Technologie (Computer Controlled Levitation) wird der Globus mit rund 16.000 Steuerimpulsen pro Sekunde ruhig in der Schwebe gehalten. Ein schöner Blickfang für Ihren Schreibtisch und ein ganz besonderes Geschenk.

**Besuchen Sie uns im Internet unter:**
**www.science-shop.de**

## mare crisium Fraktale

**Handemade Photo Memo**

48 Karten, 1 Spielanltg., verpackt in einem klarlackierten Birkenholzkästchen (23,5 x 7,5 x 5 cm), mare crisium.

**Bestell-Nr. 2515. € 35,– (D), € 35,– (A)**

*mare crisium* – schwieriges Meer (wörtl. »Meer der Gefahren«) ist ein liebevoll von Hand gestaltetes Gedächtnisspiel. Die wunderschönen Motive sind auf Qualitätsfotopapier belichtet, was ihnen eine besondere Ausstrahlung verleiht. Die Bilder wurden einzeln ausgeschnitten und auf 2 mm starke, 5,5 auf 5,5 cm große Pappkärtchen aufgezogen.

## Der Stirling-Motor Kartonbausatz

**Kartonbausatz für einen voll funktionstüchtigen Stirling-Motor**

*2006, SunWatch.*

**Best-Nr. 2321. € 21,90 (D), € 21,90 (A)**

Setzen Sie diesen voll funktionstüchtigen Stirling-Motor auf eine Tasse mit kochend heißem Kaffee (oder auf eine Kaltkompresse), geben Sie dem Schwungrad einen kleinen Schubs nach links, und der genügsame Apparat beginnt leise zu stampfen – bis zu einer Stunde lang! Bausatz aus stabilem, gestanztem Karton in liebevoll gestaltetem Golddruck, komplett mit allem Zubehör, darunter lasergeschnittene Aluminium-Bleche, reibungsarme Kunststoff-Achslager und Drahtbiegeteile aus Federstahl. Höhe 16,5 cm, Breite und Tiefe je 12,6 cm.

**Portofreie Lieferung in D&A ab einem Bestellwert von € 20,–***

## MOVIT Scroller MR-9772 E

**Mechanischer Bausatz für Kinder ab 8 Jahren**

*Mit ausf. deutschsprachiger Anleitung, Größe zusammengebaut: B111 x D103 x H103 (mm), Elekit.*

**Bestell-Nr. 2542. € 24,95 (D), € 24,95 (A)**

Ab 8 Jahren. Der SCROLLER bewegt sich sanft und leise ohne Unterbrechung vorwärts. Wenn er durch ein Hindernis gebremst wird und umfällt, richtet er sich von alleine wieder auf. Dieser einfache formschöne Bausatz mit wenigen Teilen macht nicht nur eine Menge Spaß, sondern ist auch ein perfektes Lernobjekt in jedem Alter. Stromquelle: »AA« Alkaline Batterie 1St. (nicht enthalten).

## 3DeepArt-Starterset Spielbox mit Kartenset

**Wirbeltiere Europas**

*Spielen in einer neuen Dimension. Speziell entwickelter Stereobetrachter, Abmessung: 21 x 13 x 7 cm, 48 Quizkarten, 36 Memokarten. 3DEEPART.*

**Bestell-Nr. 2490. € 28,90 (D), € 28,90 (A)**

Ab 6 Jahren. Trainieren Sie Ihr Gedächtnis, lernen Sie etwas über die Natur und genießen Sie die eigens entwickelten, ansprechenden 3D-Bilder. Es beginnt ganz harmlos als klassisches Memory, dann geht es richtig los: Die Karten können Sie in den Stereobetrachter stecken und sich zunächst an dem 3D-Bild erfreuen. Als nächstes wird Ihnen zu dem Bild eine Quizfrage gestellt. Die Quizfragen sind nach Schwierigkeit gestaffelt. Damit alte und junge Spieler gleiche Chancen haben, sind die Quizkarten in sich nochmals nach Niveau, bzw. Altersstufen unterteilt.

## Celestron SkyScout

**»Handplanetarium« mit GPS-Empfänger**

*Größe: 18,5 x 10 x 6,25 cm, Gewicht: 520 Gramm mit Batterien (zwei 1,5-V-AA-Batterien; nicht im Lieferumfang enthalten), Celestron.*

**Bestell-Nr. 2271. € 435,– (D), € 435,– (A)**

Der Celestron SkyScout ist ein revolutionäres neues »Handplanetarium« mit eingebautem GPS-Empfänger. Durch reines Anvisieren eines Himmelsobjekts identifiziert der Skyscout dieses und gibt Informationen auf einem Display und per Sprache aus. So ist der SkyScout Ihr persönliches Planetarium und Sie lernen mit ihm vieles über Sterne, Planeten und Sternbilder. Mehr über den Skyscout erfahren Sie unter www.science-shop.de/skyscout.

## H-Racer-Set

**Modellauto mit Brennstoffzelle und eigener solarbetriebener Wasserstofftankstelle**

*Anleitung in deutscher Sprache, benötigt wird destilliertes Wasser, nicht im Lieferumfang enthalten. Abmessung des Modellautos: ca: 16x7 cm. HORIZON.*

**Bestell-Nr. 2424. € 99,– (D), € 99,– (A)**

Erleben Sie spielerisch die moderne Wasserstofftechnologie: Statt Strom aus Batterien speichert das Fahrzeug Wasserstoff und setzt es in einer Brennstoffzelle in elektrische Energie um. Die mitgelieferte Wasserstoff-Tankstelle versorgt das Fahrzeug unbegrenzt mit sauberer Energie. Alles was Sie benötigen ist Wasser und Sonnenlicht: eine nahezu unbegrenzte Ressource!



*Bestellungen in D & A unter € 20,– sowie Bestellungen im sonst. Ausland berechnen wir mit € 3,50. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsges. mbH

BBC. Geschickt bestätigt und widerlegt sie die Mythen und Horrorgeschichten mit Hilfe der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse – das kommentierte, 15-seitige Literaturverzeichnis im Anhang belegt es. Die knapp 400 Seiten lesen sich erstaunlich schnell dank der flotten Sprache, dem schlichten Layout und den übersichtlichen, aufeinander aufbauenden und dennoch separat lesbaren Kapiteln.

Ein paar Schönheitsfehler bleiben anzumerken: Zum einen spricht sie immer wieder von der »unglaublichen Eleganz« hormoneller Reaktionen, verrät allerdings bis zum Schluss nicht, warum diese so ungleich eleganter sein sollen als der Zitronensäurezyklus oder die Atmungskette. Zum anderen bietet sie eine recht feministische Sichtweise auf das Thema. Volle zwei Kapitel widmen sich sehr ausführlich einem ausschließlich weiblichen Phänomen, dem Menstruationszyklus und der Menopause. Zudem reichert sie viele Themen mit privaten Anekdoten an, was nicht jedermanns Sache ist. Unpräzise Angaben wie »recht eindeutig« oder »auffällig hoch« sorgen dafür, dass es streckenweise zu sehr ins Populärwissenschaftliche abrückt.

Alles in allem hat Vivienne Parry eine klare Botschaft: Hormone sind – im Positiven wie im Negativen – nur die Überbringer von Nachrichten. Sie sind ein Spiegelbild eines Ungleichgewichts, dessen Ursache weitaus tiefer und oft völlig woanders liegt.

Die Wissenschaft von den Hormonen ist einer der spannendsten und vielschichtigsten Bereiche der Biologie; sie wird in Zukunft nicht nur im Kampf gegen die Fettsucht und auf der Suche nach dem ewig jungen Körper massiv an Bedeutung gewinnen.

*Rosa Vollmer*

Die Rezensentin ist Diplombiologin und arbeitet als freie Journalistin in Mainz.

Vivienne Parry
**Der Tanz der Hormone**
Warum wir weinerlich, glücklich, ängstlich oder einfach unausstehlich sind

Aus dem Englischen von Heike Schlatterer. Pendo, Zürich 2007. 381 Seiten, € 19,90

BIOGRAFIE

# Kernphysik in der Holzwerkstatt

Die Fachwelt wusste, dass Lise Meitner keinen geringeren Anteil an der Entdeckung der Kernspaltung hatte als Otto Hahn. Trotzdem blieb ihr der Nobelpreis verwehrt.

Dieses Buch beleuchtet das Leben von Lise Meitner von einer neuen Seite. Die Biochemikerin und Autorin Thea Derado hat zahlreiche Informationen aus Briefen, Artikeln und Biografien zu Dialogen verarbeitet, die ein lebendiges und sehr privates, fast autobiografisches Bild der großen Physikerin ergeben. Ich sah Lise Meitner wieder so vor mir, wie ich sie selbst erlebt habe, als ich mit ihr in Stockholm 1949/1950 zusammenarbeiten konnte.

Der Ausspruch »Das Leben muss nicht leicht sein, wenn es nur inhaltsreich ist« war in der Tat ihr Motto. Und leicht war es wahrhaftig nicht, denn sie war Jüdin und eine Frau. Geboren 1878, konnte sie zwar in Wien die Volksschule und die Bürgerschule besuchen, aber das Gymnasien war Jungen vorbehalten. Das Abitur konnte sie nur mit Hilfe von teuren Privatstunden ablegen. Sie durfte in Wien studieren und mit Auszeichnung promovieren, aber ihren Lebensunterhalt musste sie noch viele Jahre lang, auch später in Berlin, mit Nachhilfestunden verdienen.

Im Jahr 1907 übersiedelte sie nach Berlin, wo der Radiochemiker Otto Hahn sie gern als physikalische Mitarbeiterin aufnahm. Damit begann eine äußerst fruchtbare wissenschaftliche Zusammenarbeit und lebenslange innige Freundschaft, die auch die Familien einschloss. Da Frauen das Institut nicht betreten durften, mussten die Experimente in der Holzwerkstatt im Keller mit separatem Eingang stattfinden.

Derado beschreibt in allgemein verständlicher Weise Meitners wissenschaftliche Durchbrüche, vor allem die Deutung der Hahn'schen Experimente als Kernspaltung, aber auch schon die vorher erzielten Erfolge wie die Entdeckung des Protactiniums. Einige wenige Fachausdrücke werden in einem Anhang erklärt. Trotz der populären Darstellung sind alle Ausführungen sachlich korrekt. Nicht erwähnt werden allerdings die kalorimetrischen Messungen am radioaktiven Beta-Zerfall, die später Wolfgang Pauli die Grundlage für seine Neutrino-Hypothese lieferten.

In der Berliner Zeit lernte Meitner die Großen der damaligen Physik und Chemie kennen, wie Max Planck, James Franck, Emil Fischer und Albert Einstein. Besonders vertraute Beziehungen verbanden sie mit Max von Laue, einem der wenigen deutschen Physiker, die dem Naziregime tapfer widerstanden.

Neben der Wissenschaft spielte die Musik die zweite wichtige Rolle. Ein Klavier begleitete sie fast ihr ganzes Leben. Musik verschaffte ihr den Zugang zur Familie von Max Planck, und mit Otto Hahn sang sie in der Holzwerkstatt fröhlich zweistimmige

**Lise Meitner und Otto Hahn zu Beginn ihrer Zusammenarbeit in der »Holzwerkstatt« in Berlin (1908)**

Brahms-Lieder. Noch viele Jahre später schwärmte sie mir davon begeistert vor.

Wenig bekannt ist, dass sich Lise Meitner während des Ersten Weltkriegs dem österreichischen Militär als Röntgenologin zur Verfügung stellte, um ihre patriotische Pflicht zu erfüllen. In einem Lazarett direkt hinter der Frontlinie erlebte sie alle Schrecken des Kriegs. Diese Erfahrungen und Diskussionen mit Hahn, der selbst den Gaskrieg erlebt hatte, und dem Pazifisten Einstein führten zu Zweifeln und inneren Kämpfen.

Die Schilderung der Zwischenkriegszeit gibt nicht nur einen lebhaften Eindruck von dem mit vielen Hindernissen gespickten wissenschaftlichen Aufstieg Lise Meitners, sondern auch von dem Aufschwung der deutschen Wissenschaft, vor allem durch die Gründung der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft. Unweigerlich gehören die Machtergreifung der Nazis und die Judenverfolgung zu den Themen des Buchs. Lise Meitner genoss zunächst einen gewissen Schutz durch ihren österreichischen Pass; aber nachdem der nach dem Anschluss Österreichs mit einem »J« gestempelt wurde, konnte sie Deutschland legal nicht mehr verlassen.

## Österreichischer Charme und preußische Pflichtauffassung

Im Vertrauen auf die deutsche Kultur, wegen der Verbundenheit mit ihrem Institut und ohne auf die Warnungen ihrer Freunde zu hören, zögerte sie zu lange, bis 1938 nur noch die Flucht sie retten konnte. Holländische Kollegen ermöglichten ihr im Juli 1938 die Ausreise über eine kleine Grenzstelle. Als Abschiedsgeschenk gab Hahn ihr noch einen Brillantring, ein Erbstück seiner Mutter.

Nach einem kurzen Aufenthalt in Holland arrangierte Niels Bohr ihre Aufnahme am Nobel-Institut in Stockholm bei Manne Siegbahn. Die persönliche Chemie zwischen Lise Meitner und Siegbahn, stark beschäftigt mit dem Aufbau seines Instituts und kein Freund von Frauen in der Wissenschaft, stimmte nicht, und die Zeit an seinem Institut war mit Entbehrungen verbunden. Schließlich erhielt sie 1947 eine Forschungsprofessur mit Labor an der Technischen Hochschule in Stockholm, mit nach damaligen Maßstäben recht guten Arbeitsmöglichkeiten. Es war dort, wo sie mich in die Kernphysik einführte.

Sie nahm mich sehr freundlich auf und zeigte keine Ressentiments. Sie plauderte über ihren Lebensweg, ihre Erfolge und Leiden, und ich kann viele der im Buch erwähnten Episoden bestätigen. Sie erzählte mir, wie sie durch das Studium der deutschen Geschichte und die Lektüre von Hegel, Schelling und Nietzsche die Entwicklung des deutschen Nationalismus zu verstehen versuchte. Eine kleine, zierliche Person, eine Kombination aus österreichischem Charme und preußischer Pflichtauffassung. Bei der Justierung von Apparaturen war sie äußerst penibel und wies mich oft mit Stolz auf ihr gutes Augenmaß hin, mit dem sie schon ihre Schneiderin in Wien beim Rocksaumabstecken zur Verzweiflung gebracht hatte. Trotz ihrer Strenge war sie sehr gütig und mütterlich. Wie im Buch treffend beschrieben, war sie nicht nur eine exzellente Physikerin, sondern eine große Persönlichkeit.

Ausgiebig diskutiert Thea Derado, warum Meitner bei der Verleihung des Nobelpreises an Hahn 1945 leer ausging. Ihre Verdienste waren unbestritten. Bekannt war ihr Ausspruch »Hähnchen, das verstehst du nicht!«, und Hahn erwähnte mir gegenüber: »Ich war ja nur ein Chemiker, sie war die Physikerin!« Auch nach Veröffentlichung der Dokumente des Nobel-Komitees bleiben Fragen offen. Dass Lise Meitner eine Frau war, scheint das Komitee negativ beeinflusst zu haben. Die vielen deutschen und internationalen Ehrungen und ihr überwältigender Empfang in den USA haben sie etwas über diese Benachteiligung hinweggetröstet.

Da Lise Meitner ledig blieb, spielten ihre verschiedenen Familienbande eine wichtige Rolle. Am meisten war sie ihrem Neffen Otto Robert Frisch zugetan, mit dem zusammen sie die Kernspaltung deutete. Bei ihm in Cambridge (England) verbrachte sie ihre letzten Jahre bis zu ihrem Tod 1968.

Dieses Buch beschreibt historisch genau, gleichzeitig aber mit großem Einfühlungsvermögen das bewegte Schicksal einer der größten Wissenschaftlerinnen des vergangenen Jahrhunderts. Es ist nicht nur für geschichtlich Interessierte lesenswert, sondern dürfte auch für Frauen, insbesondere junge Wissenschaftlerinnen, ermutigend sein.

*Herwig Schopper*

Der Rezensent ist Professor für Physik und ehemaliger Direktor des europäischen Kernforschungszentrums Cern in Genf.

Thea Derado
**Im Wirbel der Atome**
Lise Meitner
Eine Frau geht ihren Weg
Ein biografischer Roman
Kaufmann, Lahr 2007. 240 Seiten, € 19,95




# Ein starker Jahrgang ...

... ist die CD-ROM 2007 von **Spektrum der Wissenschaft.** Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **spektrumdirekt**-Archiv mit ca. 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); Erscheinungstermin ca. Mitte März 2008.
Bestellen können Sie über den Beihefter oder unter:

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

WELTKLIMA

# Vermischung von Wissenschaft und Politik

Angehörige des Bundesumweltministeriums verkaufen die Politik ihres Hauses unter dem Titel »UN-Weltklimareport«.

Über kaum ein Thema wurde im vergangenen Jahr mehr geredet als über den Klimawandel. Den Höhepunkt erreichte die Aufregung während der UN-Verhandlungen im Dezember auf Bali, wo Regierungsvertreter aus aller Welt um die Klimapolitik nach 2012 rangen, dem Verfallsdatum des Kyoto-Protokolls. Laien haben es nicht gerade leicht, sich eine Meinung zum Thema zu bilden. Obendrein ist ein wesentliches Dokument nur in englischer Sprache zu haben, nämlich der im letzten Jahr publizierte UN-Klimareport des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Das aktuelle Buch erscheint da zum richtigen Zeitpunkt: Es präsentiert die Hauptresultate des IPCC-Reports auf Deutsch. Die Herausgeber und Hauptautoren arbeiten im Umweltministerium, der Diplombetriebswirt Michael Müller als parlamentarischer Staatssekretär, die Physiker Harald Kohl und Ursula Fuentes als Referenten. Zu den 22 Koautoren zählen viele namhafte Forscher, zum Beispiel Jochem Marotzke, Direktor am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, und Hans Joachim Schellnhuber, der das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung leitet. Auch die Bundesminister Sigmar Gabriel und Annette Schavan sind mit von der Partie.

Bei der Lektüre entpuppt sich allerdings das Buch, den illustren Namen zum Trotz, als eine Mogelpackung. Denn was draufsteht, ist so nicht drin: Der UN-Klimareport wird auf mageren 100 von 432 Seiten abgehandelt. Entsprechend knapp wird der Leser darüber informiert, was die Fachwelt über Ursachen und Folgen der globalen Erwärmung weiß und wie man dem Klimawandel begegnen könnte. Auch haben die Hauptautoren sich damit begnügt, ausschnittsweise die trockenen »Zusammenfassungen für Politiker« (die man sich auch von der Internetseite des Umweltministeriums herunterladen kann) in deutscher Übersetzung wiederzugeben und zu erläutern. Nur selten gibt es einen Ausschnitt aus dem mehrere tausend Seiten dicken Original.

Der Rest des Buchs liest sich über weite Strecken wie eine Programmschrift des Umweltministeriums: Müller, Fuentes und Kohl beschwören die Gefahr einer Klimakatastrophe, preisen den Handel mit Emissionszertifikaten und fordern eine Reform des Kapitalismus: Die Verfassung von Wirtschaft und Unternehmen soll »grün und sozial« werden. Mit dem Inhalt des IPCC-Reports hat das nicht viel zu tun.

## »Unheil planetaren Ausmaßes«

Etwa ein Drittel der Texte in dem Band stammt von den Hauptverfassern. Zur Vertiefung in diverse Themen des Klimareports dienen die Essays der Koautoren, die einen sachlicheren Eindruck machen. Besonders ausführlich wird erörtert, wie sich der Ausstoß von Treibhausgasen verringern ließe – durch Energiesparen, erneuerbare Energiequellen oder die $CO_2$-Speicherung etwa. Die Anpassung an den Klimawandel wird eher stiefmütterlich behandelt. Das irritiert ein wenig. Es wäre ja in jedem Fall lohnenswert, sich gegen Trockenperioden oder Überschwemmungen zu wappnen – selbst dann, wenn sich die Klimakatastrophe als Katastrophchen herausstellen sollte.

Doch die Hauptverfasser sind darauf fixiert, ein Unheil planetaren Ausmaßes zu bekämpfen. So erklärt sich auch der vermessene Untertitel des Buchs: Die Anspielung auf ein Theaterstück von Brecht über das Emporkommen Hitlers (»Der aufhaltsame Aufstieg des Arturo Ui«) soll den Sinn des Unternehmens moralisch überhöhen. Zweifel an den Prognosen werden kleingeredet, eine Auflistung der Stärken und Schwächen von Klimamodellen sucht man vergebens. Stattdessen dominiert ein Gestus des Überredens. So fängt das Buch schon an: »Die Erde hat Fieber, unser Planet ist krank. Und der Mensch ist der Virus, der das Fieber in die Höhe treibt.«

Die Hauptautoren kritisieren erwartungsgemäß vor allem den Präsidenten der USA. Sie verdächtigen Bush, er wolle aus den 15 größten $CO_2$-Emittenten der Erde bloß deshalb eine Allianz für den Klimaschutz schmieden, weil er bei dieser Gelegenheit heimische Technologien fördern kann. Als ob die deutsche Regierung das Weltklima aus purem Idealismus retten wollte! An anderer Stelle aber fällt die Pose in sich zusammen: »Die Ausrichtung auf ökologische Dienstleistungen eröffnet gerade unserem Land große ökonomische Chancen.« Deutschland verfüge bei Umwelttechnologien »über deutliche Vorsprünge«.

Schwerer als diese Scheinheiligkeit wiegt die Vermischung von Wissenschaft und Politik. Die vorsichtig formulierten wissenschaftlichen Essays dienen als Feigenblatt der Seriosität. Die Hauptverfasser übernehmen den Job, das künftige Klima in den düstersten Farben auszumalen. Im Anschluss daran werden die in Frage kommenden Maßnahmen nicht etwa offen und neutral besprochen, sondern vorsortiert: Fachleute wählen die gewünschten politischen Handlungsoptionen für uns aus. Die $CO_2$-Vermeidung erhält den Vorrang vor der Anpassung an die Erwärmung, und mit kuriosen Argumenten wird der Verzicht auf die Kernenergie als Maßnahme für den Klimaschutz verkauft.

Der langen Rede kurzer Sinn: Die Herausgeber münzen das hohe Ansehen des IPCC in die Legitimation der ministeriellen Strategie um. Es ist nicht ganz klar, warum sich renommierte Wissenschaftler dafür als Koautoren zur Verfügung gestellt haben. Die Wissenschaft wird hier politisiert und die Politik verwissenschaftlicht. Das scheint mir weder den Entscheidungsprozess transparenter zu machen noch die akademische Unabhängigkeit zu stärken.

Hilfreicher wäre es gewesen, die Verfasser hätten den Klimareport einfach ausführlich und leserfreundlich erläutert, sodass man sich selbst ein Bild vom Stand der Wissenschaft machen kann. Die Chance ist vertan – nun bleibt nur die Empfehlung, doch einmal einen Blick in die sibirischen Weiten des Originalberichts zu riskieren. Über die Internetseite des IPCC (http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm) ist das Opus magnum zugänglich.

*Sven Titz*

Der Rezensent ist promovierter Meteorologe und freier Journalist in Berlin.

Michael Müller,
Ursula Fuentes und Harald Kohl (Hg.)
**Der UN-Weltklimareport**
Bericht über eine aufhaltsame Katastrophe
Kiepenheuer und Witsch, Köln 2007.
432 Seiten, € 12,95

**Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen**

**direkt bei: www.science-shop.de**
**per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de**
**telefonisch: 06221 9126-841**
**per Fax: 06221 9126-869**

# VORSCHAU

Heft April 2008
ab 25. März im Handel

ADAM QUESTELL

## Aliens unter uns?

Sogar auf der Erde könnte Leben mehrfach entstanden sein. Forscher suchen nach seltsamen Mikroben, die sich radikal von allen bekannten Organismen unterscheiden

WEITERE THEMEN IM APRIL

### Durchblick mit Terahertz

Strahlen im Terahertzbereich durchdringen Stoffe aller Art. Doch erst jetzt lernen Forscher, sie für Wissenschaft und Technik zu nutzen

### Tiere in Bewegung

Ob Tiere schwimmen, rennen oder fliegen – physikalisch ähneln sich die Vorgänge ganz erstaunlich

JEFF JOHNSON, HYBRID MEDICAL ANIMATION

### Krebs und Entzündung

Eigentlich soll das Immunsystem krebsartiges Gewebe eliminieren. Doch offenbar schaffen es Tumorzellen, die Teile der Körperabwehr für sich einzuspannen, die Entzündungen auslösen

### Ein Fenster zum heißen Universum

Das neue Weltraumteleskop Glast wird schon ab Mai hochenergetische kosmische Gammastrahlen beobachten. Damit sollen rätselhafte Phänomene wie die Existenz der Dunklen Materie aufgeklärt werden

ALFRED T. KAMAJIAN

**Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?**

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

**www.spektrum.com/newsletter**